

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

**М. І. Самойленко, Т. С. Сенчук**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В РОЗВИТКУ  
ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ  
СИСТЕМ**

**МОНОГРАФІЯ**

*За редакцією М. І. Самойленка*

**ХАРКІВ ХНАМГ 2010**

УДК 656.56:004  
ББК 39.7+73  
С17

**Самойленко Микола Іванович  
Сенчук Тетяна Сергіївна**

*Рецензенти:*

*Анатолій Іванович Колосов*, завідувач кафедри вищої математики Харківської національної академії міського господарства, доктор фізико-математичних наук, професор.

*Михайло Давидович Гінзбург*, завідувач науково-дослідного центру №11 Науково-дослідного інституту АСУТРАНСКАЗ, доктор технічних наук, професор.

Рекомендована до друку Вченою радою ХНАМГ,  
протокол № 10 від 2.07.2010 р.

**Самойленко М. І.**

**С17** Інформаційні технології в розвитку трубопровідних транспортних систем: монографія. / М. І. Самойленко, Т. С. Сенчук; за ред. М. І. Самойленка; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2010. - 244 с.

ISBN 978–966–695–179–6

У монографії викладається аналітичний метод генерації математичних моделей для розрахунку функціональної надійності трубопровідних транспортних систем зі складною мережною структурою. Наводиться комп'ютерна технологія перевірки їх адекватності. Здійснюється порівняльний аналіз магістральних трубопровідних систем різних конструкцій за критерієм функціональної надійності.

Для наукових і інженерно-технічних працівників науково-дослідних, проектних і виробничих організацій, пов'язаних з проектуванням, експлуатацією та реконструкцією трубопровідних систем.

**УДК 656.56:004  
ББК 39.7+73**

ISBN 978–966–695–179–6

© М. І. Самойленко, Т. С. Сенчук, 2010  
© ХНАМГ, 2010

## Зміст

Передмова . . . . .	6
<b>Розділ 1</b>	
<b>Проблеми надійності напірних трубопровідних транспортних систем. . . . .</b>	<b>10</b>
1.1. Загальна характеристика напірних трубопровідних транспортних систем як об'єкта дослідження . . . . .	10
1.2. Функціональна надійність напірних трубопровідних транспортних систем як предмет дослідження. . . . .	13
1.3. Управління процесами експлуатації та розвитку трубопровідних транспортних систем за критерієм функціональної надійності . . . . .	18
1.4. Основні суперечності в процесах експлуатації та розвитку напірних трубопровідних транспортних систем і предмет дослідження . . . . .	20
1.5. Експлуатація та розвиток напірних трубопровідних транспортних систем з урахуванням їх надійності . . . . .	23
1.6. Цілі дослідження . . . . .	25
1.7. Огляд існуючих методів розрахунку надійності напірних трубопровідних транспортних систем . . . . .	27
1.8. Висновки та завдання дослідження . . . . .	32
<b>Розділ 2</b>	
<b>Розрахунок функціональної надійності напірних трубопровідних транспортних систем методом аварійно-ремонтних зон . . . . .</b>	<b>35</b>
2.1. Формування математичної моделі напірної трубопровідної транспортної мережі . . . . .	36
2.2. Розбиття напірної трубопровідної транспортної мережі на аварійно-ремонтні зони . . . . .	42
2.3. Розрахунок технічної надійності аварійно-ремонтної зони. . . . .	50
2.4. Перетворення початкового графа мережі в граф аварійно-ремонтних зон . . . . .	53
2.5. Побудова спрощеного макрографа мережі стосовно конкретного споживача. . . . .	56
2.6. Побудова розрахункової моделі функціональної надійності трубопровідної транспортної мережі стосовно конкретного споживача . . . . .	58

<b>2.7.</b> Математична модель функціональної надійності мережі стосовно конкретного споживача. . . . .	60
<b>2.8.</b> Порівняльний аналіз трубопровідних мереж за критерієм функціональної надійності . . . . .	63

### **Розділ 3**

<b>Структурні методи підвищення функціональної надійності магістральних трубопровідних транспортних систем . . . . .</b>	<b>67</b>
--	-----------

<b>3.1.</b> Особливості магістральних трубопровідних транспортних систем і способи підвищення їх функціональної надійності . .	67
<b>3.2.</b> Резервування магістральних трубопроводів . . . . .	70
<b>3.3.</b> Установка додаткових засувки як засіб підвищення функціональної надійності . . . . .	78
<b>3.4.</b> Установка перемички між паралельними трубопроводами як засіб підвищення функціональної надійності . . . . .	84

### **Розділ 4**

<b>Вибір оптимальної конструкції перемички за критерієм функціональної надійності . . . . .</b>	<b>94</b>
---	-----------

<b>4.1.</b> Типи перемичок в магістральних трубопровідних транспортних систем . . . . .	94
<b>4.2.</b> Побудова математичної моделі функціональної надійності магістральної трубопровідної системи з одною перемичкою . .	99
<b>4.3.</b> Перший модифікований метод аварійно-ремонтних зон для побудови математичної моделі оцінки функціональної надійності системи . . . . .	101
<b>4.4.</b> Другий модифікований метод аварійно ремонтних зон для побудови математичної моделі функціональної надійності системи . . . . .	109
<b>4.5.</b> Порівняльний аналіз практичної корисності перемичок за критерієм функціональної надійності . . . . .	121
<b>4.6.</b> Вплив надійності запірної арматури на функціональну надійність системи . . . . .	129

### **Розділ 5**

<b>Адекватність моделей функціональної надійності трубопровідних систем . . . . .</b>	<b>132</b>
---	------------

<b>5.1.</b> Цілі перевірки адекватності та шляху їх досягнення . . . . .	132
<b>5.2.</b> Особливості обчислювального експерименту для перевірки адекватності математичної моделі . . . . .	135
<b>5.3.</b> Визначення параметрів відмов трубопровідних ділянок. . . . .	135
<b>5.4.</b> Визначення параметрів відмов запірної арматури . . . . .	141

<b>5.5.</b>	Прив'язка відмов трубопроводів до аварійно-ремонтних зон. .	145
<b>5.6.</b>	Побудова карт впливу відмов на постачання цільового продукту конкретним споживачам. . . . .	146
<b>5.7.</b>	Побудова строкових діаграм постачання цільового продукту конкретним споживачам. . . . .	152
<b>Розділ 6</b>		
<b>Перевірки адекватності моделей функціональної надійності</b>		<b>156</b>
<b>6.1.</b>	Процедури універсального обчислювального експерименту для перевірки адекватності моделей функціональної надійності трубопровідних систем. . . . .	156
<b>6.2.</b>	Особливості обчислювального експерименту з перевірки адекватності моделей функціональної надійності простих трубопровідних систем . . . . .	158
<b>6.3.</b>	Спрощений обчислювальний експеримент по перевірці адекватності моделей функціональної надійності простих трубопровідних мереж . . . . .	161
<b>6.4.</b>	Обчислювальний експеримент з перевірки адекватності моделей функціональної надійності з урахуванням надійності запірної арматури . . . . .	167
	Післямова . . . . .	178
	Словник термінів. . . . .	180
<b>Додатки . . . . .</b>		<b>185</b>
	Додаток А. Ліміти відносного підвищення функціональної надійності системи за рахунок резервування. . . . .	185
	Додаток В. Максимальне абсолютне підвищення функціональної надійності системи за рахунок резервування. . . . .	186
	Додаток С. Побудова математичних моделей функціональної надійності магістральної системи з однією перемичкою . . . . .	190
	Додаток Д. Побудова математичних моделей функціональної надійності системи з однією перемичкою першим модифікованим методом аварійно-ремонтних зон . . . . .	210
	Додаток Е. Обчислювальні експерименти з перевірки адекватності математичних моделей розрахунку функціональної надійності . . .	234
	Список використаних джерел інформації . . . . .	240

## *Передмова*

Україна займає одне з перших місць у світі за насиченістю магістральними й розподільними трубопровідними системами. Більшість з них дісталися Україні за спадком від колишнього СРСР. В даний час трубопровідні системи продовжують розвиватися і постійно відвойовувати все нові і нові позиції в різних галузях господарської діяльності. Все частіше можна почути в економічних оглядах про перспективні проекти, пов'язані із створенням нових магістральних нафтових і газових систем, а також з розвитком існуючих водопровідних і теплових магістралей.

У безперервності транспорту цільового продукту в рівній мірі зацікавлені і виробники цільового продукту, і експлуатаційники трубопровідних систем, і споживачі. Знов споруджувані трубопровідні системи володіють достатньою надійністю і не викликають особливої тривоги з приводу непередбачених збоїв в постачаннях цільового продукту. На жаль, досить високою надійністю володіють тільки трубопровідні системи з малим терміном експлуатації. Якої б початкової міцності не мали системи, якою б стійкістю до корозії і пошкоджень не володіли, час невідворотно працює проти них. Півстолітня експлуатація більшості трубопровідних систем України сильно відбилася на їх здатності працювати без збоїв і виконувати свої функціональні завдання. Високий ступінь зношеності існуючих трубопровідних систем є основною причиною зростання аварійності і загрози техногенних катастроф. У зв'язку з цим все частіше виникає необхідність термінової заміни або невідкладного відновлення працездатності окремих ділянок і всієї трубопровідної системи в цілому.

В умовах економічної кризи, що вразила більшість країн світу, і ринкової економіки, яку прагне підтримувати і розвивати Україна, проблема надійності набуває особливої актуальності. Тепер будь-який підприємець, який вкладає особисті кошти у виробництво або спонсорує інноваційні проекти, хоче не тільки отримувати певний прибуток, але і мати гарантії його отримання надалі. В умовах жорсткої конкуренції керуватися тільки одним прибутком, яким би він не був привабливим, – це неприпустима вільність, здатна загубити найперспективніші починання і привести до небажаних результатів. Щоб уникнути невиправданого ризику, треба при оцінці ефективності прийняття рішень обов'язково враховувати показник надійності» [44].

При проектуванні й експлуатації трубопровідних транспортних систем показник їх надійного функціонування повинен бути не нижче певного порогу. Якщо надійність системи опускається нижче за допустимий поріг, то споживач не отримує необхідного для нього цільового продукту в потрібній кількості або заданої якості і, кінець кінцем, відмовляється від послуг транспортного (комунального) підприємства. Такої відмови в першу чергу слід чекати від споживачів з безперервним виробничим циклом, коли зрив постачань приводить до великих матеріальних втрат або екологічних катастроф.

Для виробників цільового продукту і експлуатаційників трубопровідних систем низька надійність постачання продукту – це втрата потенційних споживачів, зростання фінансових витрат через судові тяжби і штрафні санкції, безперспективність розвитку ринку. Як наслідок, для виробників це є зниження прибутків від неповної реалізації цільового продукту, а для експлуатаційників – від простоїв і часткового використання транспортних потужностей.

Для всіх суб'єктів, пов'язаних з трубопровідною системою, проблема надійності є суперечливою. Так, виробники і споживачі цільового продукту, з одного боку, хочуть, щоб трубопровідна система була надійною, а з іншого – щоб транспортні послуги були дешевими. Експлуатаційники, з одного боку, прагнуть забезпечити надійність системи в майбутньому на належному рівні, а з іншої – виділяти якомога менше фінансових, матеріальних і трудових ресурсів для досягнення і підтримки цього рівня.

Усунення суперечності може бути досягнуте тільки за допомогою відшукування компромісного значення поточної надійності, яке в рівній мірі задовольняло б усіх суб'єктів системи. Компромісне значення обов'язково повинне бути не нижче мінімально допустимої величини, оговореної всіма суб'єктами в двобічних договірних зобов'язаннях. При цьому відхилення від мінімально допустимого значення у бік збільшення повинне бути незначним, оскільки підвищення надійності для діючих систем навіть на соті долі відсотка пов'язано з великими ресурсними витратами.

У такій ситуації для успішного вирішення проблеми необхідно мати достовірний метод побудови математичних моделей для розрахунку показників функціональної надійності трубопровідних транспортних систем. Існуючі методи розрахунку надійності трубопровідних мереж орієнтовані на розрахунок показників, що характеризують їх технічний стан [3, 11, 14, 20–27, 37–38] або точність гідравлічного розрахунку по доставці і розподілу цільового продукту [15–17]. Питання ж функціональної надійності трубопровідних мереж або не розглядаються взагалі, або стосуються тільки її оцінки [35].

Серед різних видів трубопровідних транспортних систем важливе місце займають водопровідні. На думку Ю.О.Ільїна [21], «актуальність питання підвищення якості і надійності систем водопостачання все більш зростає, тому вкрай необхідне його практичне вирішення на стадіях проектування, будівництва та експлуатації водопроводів будь то промислового чи господарського значення. Проте у вітчизняній літературі питання методики оцінки і забезпечення показників надійності систем водопостачання на етапі проектування, як і питання забезпеченості розходу та якості води в процесі експлуатації системних споруд, освітлені недостатньо. У зв'язку з цим намітився розрив між вимогами, які пред'являють діючі нормативні документи до проектної документації, з одного боку, і можливістю інженерів виконувати відповідні обґрунтування надійності водопровідного устаткування за відсутності технічної літератури – з іншого».

Як бачимо, навіть оцінка надійності трубопровідних систем має велику практичну значимість. Безперечно, отримання точного значення надійності має ще вищу актуальність.

У цій монографії викладається аналітичний метод побудови математичних моделей для розрахунку точного значення показника функціональної надійності трубопровідних мереж – імовірності безперебійного постачання цільового продукту протягом певного періоду часу. Автори поставили собі мету розробити метод, який дозволив би при розрахунку ймовірності неперервного постачання цільового продукту конкретному користувачеві повністю враховувати структуру і склад трубопровідної мережі.

Для доведення адекватності отримуваних математичних моделей розроблена спеціальна комп'ютерна технологія, в основу якої покладено цифрове моделювання трубопровідних мереж і процесів їх функціонування. Вбудовані програмні генератори випадкових чисел дозволяють досягати повної відповідності між віртуальними і реальними процесами експлуатації трубопровідних систем. Проведення обчислювальних експериментів із застосуванням статистичних методів розрахунку функціональної надійності забезпечує достовірну перевірку адекватності математичних моделей і відкриває шлях до їх практичного використання. Власники, постачальники й споживачі напірних трубопровідних транспортних систем отримують додаткову гарантію для їх надійного функціонування.

Зміст монографії відображує результати дослідницької роботи, що проводилися в 1998 – 2010 р.р. колективом учених кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Харківської національної академії міського господарства у складі М. І. Самойленка [7–9, 42–50],



Т. С. Сенчук-Передерій [47–50], І. О. Рудя [36–39], І. О. Гавриленко [7–10], О. Б. Костенка, В. П. Протопопової.

Автори виражають щиру подяку за консультаційну підтримку і надання практичної бази для апробації наукових результатів дослідницької роботи з тематики монографії ученим-виробничникам: головному інженерові комунального підприємства «СПКБ АСУ водопостачанням»; д-ру техн. наук., професору Панасенко О.О.; головному інженерові ВАТ «Харківміськгаз», канд. техн. наук доценту Сідаку В.С. і директорові комунального підприємства «Харківські теплові мережі» Андрєєву С.Ю.

*Автори*

## РОЗДІЛ 1

### ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

#### 1.1. Загальна характеристика напірних трубопровідних транспортних систем як об'єкта дослідження

Напірні трубопровідні транспортні системи (НТТС) є комплексом елементів, що включають:

- споруди для прийому цільового продукту (води, газу, стислого повітря, нафти і нафтопродуктів);
- насосні чи компресорні станції для створення рушійної сили;
- магістральні трубопроводи для подачі цільового продукту (ЦП) до місця його споживання чи переробки;
- резервуари або підземні сховища для забезпечення стратегічних або технологічних запасів ЦП;
- очисні споруди і лабораторії для підвищення якості, переробки чи знезараження ЦП;
- трубопровідну мережу для розподілу ЦП між споживачами (промисловими підприємствами, установами, мікрорайонами, житловими кварталами, окремими будівлями та іншими об'єктами).

У кожній конкретній НТТС її склад може значно відрізнятися від перерахованого комплексу елементів. Але в системі завжди присутні, принаймні, одна споруда, що утворює напір (насосна або компресорна станція), та трубопровідна мережа (магістральна або розподільна).

У загальному випадку НТТС зв'язує одного або декількох виробників ЦП з одним або декількома споживачами ЦП. Проста схема постачання, коли тільки один виробник забезпечує цільовим продуктом тільки одного споживача, показана на рис. 1.1.



Рис. 1.1 – Проста схема постачання цільового продукту

У наведеній схемі є виділений блок НТТС. Зв'язано це з тим, що *об'єктом дослідження* є процеси експлуатації і розвитку саме *напірних трубопровідних транспортних систем*, тоді як виробник і споживач не є ключовими елементами дослідження. Надалі, якщо не буде обумовлено окремо, виробника ЦП ототожнюватимемо з джерелом продукту і називати просто джерелом, а споживача ЦП – просто споживачем.

Перелічимо основні типи НТТС, що відрізняються один від одного своїм призначенням, але для яких справедливі результати цього дослідження і для яких доцільно їх використовувати. До таких систем в першу чергу слід віднести:

- нафто- й газопроводи для транспорту природного газу та нафти від місць здобичі до видалених місць їх переробки;
- магістральні продуктопроводи, що призначені для переміщення готових нафтопродуктів із заводів в райони споживання;
- магістральні теплопроводи;
- гідравлічні магістральні трубопроводи для транспорту твердих вантажів;
- перспективні магістральні системи майбутнього для перевезення твердих вантажів і людей на значні відстані (пневмокапсульні трубопроводи);
- нафтопроводи для транспортування нафти з промислів на основні споруди магістрального нафтопроводу;
- нафтопродуктопроводи для транспортування продуктів нафтопереробки з нафтопереробних заводів на головні споруди магістральних нафтопродуктопроводів;
- напірні трубопровідні ділянки обводнювальних, зрошувальних і дренажних систем, які мають протяжність, сумірну з протяжністю магістральних трубопроводів;
- трубопроводи для транспортування води від забірних насосних станцій до місць її очищення;
- напірні водовідвідні колектори міських каналізаційних мереж, що забезпечують видалення стічних вод (побутових, промислових, атмосферних і вулицеполивальних) за межі населених пунктів або промислових підприємств;
- трубопровідні ділянки від насосних станцій другого підйому або подальших підйомів, що подають очищену воду видаленим населеним пунктам або видаленим промисловим підприємствам;
- міські комунальні мережі (водопровідні, теплові, каналізаційні);

– інженерні мережі промислових підприємств (пневматичні, вентиляційні, водопровідні, газові, теплові та ін.).

Існуючі НТТС можна класифікувати не тільки за їх призначенням. Так, залежно від довжини трубопроводних ділянок їх можна розбити на магістральні й розподільні; від виду цільового продукту – на водо-, газо-, тепло-, нафтопровідні, вентиляційні, пневматичні й т. п.; від величини натиску – на системи високого, середнього низького тиску. Класифікація може проводитися і за іншими ознаками.

Важливо відзначити те, що їх об'єднує. Основною об'єднуючою ознакою всіх систем, процеси в яких підпадають під поняття «об'єкт дослідження», є наявність у їх структурі *напірних трубопроводних ділянок* завдовжки від декількох метрів до декількох кілометрів.

Якщо тепер насосні й компресорні станції умовно віднести до джерел ЦП, то проста трубопроводна транспортна система складатиметься тільки з однієї трубопроводної мережі. Схема такої системи графічно зображена на рис. 1.2.

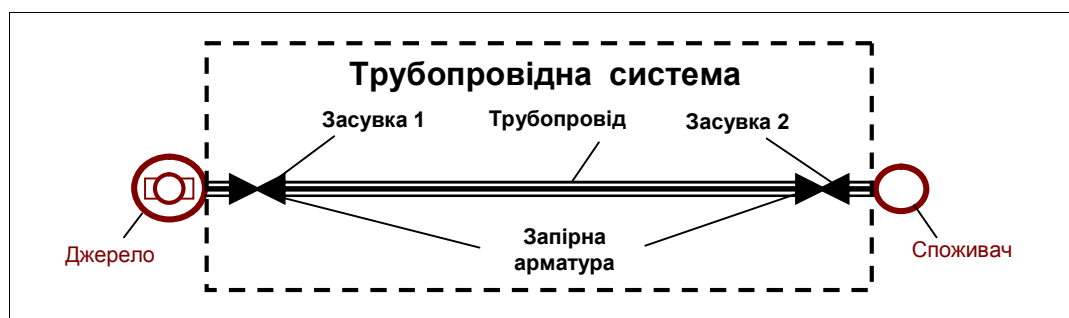


Рис. 1.2 – Схема простої трубопроводної транспортної системи

Таким чином, об'єкт дослідження в обов'язковому порядку зв'язаний з процесом транспорту ЦП від деякого джерела (водозабірної станції, підприємства з переробки продукту, насосної станції, насосного агрегату, свердловини, пункту відбору або інших подібних споруд) до деякого споживача продукту. В ролі споживача можуть виступати як окремі особи і організації (в муніципальних системах життєзабезпечення), так і окремі виробничі споруди (розподільні пункти, станції очищення) чи цілі підприємства (в магістральних і промислових системах сировинного забезпечення виробництва).

Умовне видалення з НТТС напоростворюючих елементів дозволяє звузити об'єкт дослідження до процесів експлуатації і розвитку трубопроводних мереж. Надалі під НТТС матимемо на увазі *трубопроводну мережу* складної топологічної структури.

Як бачимо на рис. 1.2, навіть у простій НТТС присутня запірна арматура. Наявність запірної арматури в НТТС є другою суттєвою ознакою об'єкту дослідження. Запірна арматура, як і трубопровідні ділянки, є тими елементами НТТС, з якими пов'язані основні наукові результати даного дослідження.

Як запірну арматуру в трубопровідних системах використовують засувки, вентилі, крани-регулятори, клапани, газорегуляторні пристрої та інші подібні пристрої. Одні з них призначені для регулювання пропускної спроможності трубопроводу в одному напрямі, інші – для регулювання пропускної спроможності трубопроводу в двох напрямках, треті – для запобігання транспортуванню ЦП у зворотному напрямі.

З погляду дослідження запірна арматура є інструментом для припинення доступу ЦП на конкретну ділянку трубопроводу під час проведення ремонтних або профілактичних робіт.

Надалі всі види запірної арматури називатимемо засувками. При цьому розглядатися вона буде не як можливий регулятор пропускної спроможності трубопровідної ділянки, а як засіб пропуску або не пропуску ЦП через ділянку зі встановленою запірною арматурою.

Продукт, що транспортується, або носій продукту (наприклад, вода, пара в теплових мережах) в НТТС може знаходитися в рідкому або газоподібному стані. Агрегатний стан продукту або його носія в цьому дослідженні не має принципового значення. Головне – це здатність продукту або його носія створювати натиск (напір), тобто забезпечувати транспортування за рахунок різниці тиску.

Продукт, що транспортується, надалі називатимемо цільовим продуктом незалежно від його агрегатного стану, в тому числі тепло, для якого агрегатний стан взагалі не має сенсу.

## **1.2. Функціональна надійність напірних трубопровідних транспортних систем як предмет дослідження**

Всі НТТС, що підпадають під поняття «об'єкт дослідження», мають не тільки схожі конструктивні елементи (джерело, трубопровід, запірну арматуру), але і однакове, по суті, функціональне призначення. Всі вони покликані забезпечити безперервну доставку споживачеві цільового продукту в заданій кількості і заданої якості протягом тривалого періоду часу (роки, десятиліття) за допомогою просторово протяжних напірних трубопроводів.

І «задана кількість», і «задана якість» є найважливішими функціональними вимогами до системи. Ці вимоги в рівній мірі, але з різних причин знаходяться під постійною увагою всіх суб'єктів, що мають

відношення до транспортування цільового продукту. Як суб'єктів НТТС розглядатимемо виробника ЦП, експлуатаційника НТТС і споживача ЦП.

Виробник ЦП – це підприємство, що здійснює виробництво, видобуток або переробку ЦП. Як виробника ЦП можна вважати промислові підприємства, заводи з переробки, очисні споруди, підприємства з виробництва сипких матеріалів і тому подібне.

Експлуатаційником НТТС є підприємство, що експлуатує трубопровідну транспортну систему і забезпечує безпосередньо транспорт ЦП від виробника до споживача.

Споживач ЦП – це підприємство, об'єкт або суб'єкт, що безпосередньо використовує ЦП або як енергетичну сировину, або як технологічну сировину для виробництва, або як продукт для подальшої переробки, або як кінцевий продукт споживання (питний, поливальний).

Перша функціональна вимога (задана кількість) визначає продуктивність системи і її пропускну спроможність. Продуктивність системи повинна бути не нижче за сумарну потребу в ЦП всіх споживачів за одиницю часу (година, доба, місяць, рік) з урахуванням можливих втрат в процесі транспортування продукту і збоїв устаткування за ту ж одиницю часу. Іншими словами, кількість цільового продукту, що поступає від джерела в трубопровідну мережу, повинна відповідати потребам споживання і непродуктивним витратам.

Продуктивність системи задається як кількість цільового продукту (об'єм, вага, тепло і тому подібне) в одиницю часу.

Продуктивність НТТС цікавить виробника ЦП як потенційна гарантія можливості збуту продукції. Якщо виробник упевнений в такій гарантії, він не витратить час і засоби на пошук нових транспортних посередників між собою і споживачем.

Для споживача продуктивність НТТС – це умова його нормального існування. Недопостача ЦП може обернутися для споживача великими, інколи катастрофічними, втратами. Однак навіть достатня продуктивність системи, але без якого-небудь її запасу, позбавляє споживача можливості вільно розвиватися.

Для експлуатаційника продуктивність НТТС – це та виробнича потужність, яка визначає і забезпечує функціонування всієї системи в теперішній і найближчий час. Якщо продуктивність системи не викликає сумнівів, то, безумовно, її експлуатація є ефективнішою, а її розвиток – перспективнішим і доцільнішим. Така система приваблива як для виробника, так і для його споживача.

Таким чином, недостатня продуктивність системи робить її нестійкою і, зрештою, приводить до загибелі самої системи. Всю відповідальність за належну продуктивність системи несе експлуатаційник.

Друга функціональна вимога (задана якість), як і перша, також впливає на стійкість системи. Ця вимога диктує системі додаткові умови до продукту, що транспортується, і, як правило, вказує на нижній допустимий поріг того або іншого параметра (або декількох параметрів) ЦП, окрім його кількості. Таким параметром може бути тиск (для ЦП в рідкому або газоподібному агрегатному стані), температура, ступінь забруднення або очищення продукту та ін.

У ряді транспортних систем для експлуатаційника дана вимога не є критичною, наприклад, в теплових, гідравлічних і пневмокапсульних. В останніх за якість ЦП відповідальність несе виробник. Проте в більшості випадків, коли показником якості ЦП трубопровідних систем є мінімально допустимий тиск, під яким ЦП безпосередньо поступає до споживача, відповідальність за якість частково несе виробник, а частково експлуатаційник.

Продукт недостатньої якості, безумовно, не потрібний споживачеві. Продукт недостатньої якості може бути і руйнівним для всієї системи. Так, наявність шкідливих домішок в ЦП приводить до згубної корозії трубопроводу, а надмірний натиск – до його розриву. Недостатня якість ЦП є другою причиною, за якою споживач і експлуатаційник можуть відмовитися від такої системи постачання.

Різне відношення суб'єктів у системах постачання до продуктивності і якості ЦП ділить їх на два табори. До одного табору належать виробники і експлуатаційники, які прагнуть залучити споживачів, до іншого – споживачі, які прагнуть отримувати ЦП в заданій кількості і заданій якості. Тому досить часто виробники і експлуатаційники виступають в одній особі як постачальники ЦП. Особливо явно це виражено в системах постачання, в яких продуктивність і якість ЦП взаємно залежні. До таких систем відносяться всі напірні системи постачання, в яких роль цільового продукту відіграє рідина або газ, тобто всі напірні системи, окрім гідравлічних, теплових і пневмокапсульних. В останніх експлуатаційник несе відповідальність тільки за якість носія ЦП, а виробник – безпосередньо за якість самого ЦП.

Результати цього дослідження безпосередньо стосуються як якості носія ЦП, так і якості самого ЦП, якщо він є газ або рідина. Результати дослідження жодним чином не зв'язані з якістю ЦП, якщо продуктом є

тепло, тверді і сипкі матеріали, пасажери пневмокапсульного транспорту і їм подібне.

Продуктивність (пропускна спроможність) системи і якість ЦП грають важливу роль в оцінці стійкості і живучості системи постачання. Проте дані функціональні показники не є визначальними, коли мова йде про довгострокові договори і контракти на постачання ЦП споживачам.

В умовах ринкової економіки кожен підприємець для успішного ведення свого бізнесу повинен враховувати не тільки поточні показники, що характеризують функціональні можливості партнерів, а й стабільність цих показників в найближчий час. Якщо виробничі показники постачальників ЦП мають тенденцію до стрибкоподібних змін, то підприємець-споживач повинен застрахуватися від непередбачених збоїв в постачанні ЦП. З цією метою при укладенні договорів на постачання ЦП обмовляються штрафні санкції за порушення якості ЦП або зриву термінів постачань. При цьому чим більше ризик, тим більш жорсткі санкції накладаються на постачальників.

Збій постачань в НТТС може відбуватися з різних причин. Одні причини можна попередити, інші ні. Так, розрив магістральних труб в наслідок землетрусу передбачати практично неможливо, та і ймовірність такої події нікчемна мала. А ось вихід з ладу протяжного трубопроводу внаслідок старіння, корозії або замулювання труб відбувається з певною ймовірністю. При цьому чисельне значення ймовірності виходу з ладу трубопроводу досягає такої величини, яка може перекреслити всі плани постачання ЦП споживачеві. Безумовно, в цьому випадку треба обов'язково враховувати можливість зриву постачань.

Будь-яка трубопровідна ділянка, як і будь-яка запірна арматура, має певну технічну надійність, тобто ймовірність виходу з ладу протягом певного періоду часу (сезон, рік, десятиліття). Дані про технічну надійність беруться з технічного паспорта трубопроводу (запірної арматури) з урахуванням терміну експлуатації або визначаються на основі:

- статистичних даних про стан даного трубопроводу (запірної арматури) на протязі всього часу з моменту його введення в експлуатацію;
- усереднених даних про стан інших трубопроводів (запірної арматури), які споруджувалися і експлуатувалися в умовах, аналогічних даному трубопроводу (запірній арматурі).

Експлуатаційник НТТС добре поінформований про технічний стан всіх конструктивних елементів системи і прагне їх підтримувати на рівні не нижче допустимого для вирішення своїх функціональних завдань. Часткове відновлення надійності здійснюється за рахунок проведення профілактичних робіт, які дозволяють очистити трубопровідні ділянки і



запірну арматуру від накопиченого мула, іржі і осадових речовин чи відрегулювати запірну арматуру. Проте як би якісно не проводилися профілактичні роботи, із збільшенням періоду експлуатації із-за корозії та фізичної втоми матеріалу виготовлення технічна надійність всіх конструктивних елементів системи поступово падає. Рано чи пізно вона досягає критичного рівня, для якого ймовірність виникнення аварії неприпустимо велика. В цьому випадку експлуатаційник вимушений або замінити застарілий елемент новим або зарезервувати його додатковим елементом.

Підтримка технічної надійності НТТС на належному рівні – це безпосереднє завдання для експлуатаційника. Виробника і споживача ЦП не цікавить, якою технічною надійністю володіє той або інший елемент НТТС. Їх хвилює *функціональна надійність НТТС, і в першу чергу, такий його показник як імовірність безперервного транспортування ЦП від виробника до споживача за допомогою НТТС протягом певного періоду часу. Яким чином належна функціональна надійність системи досягається і забезпечується – це проблема експлуатаційника НТТС.*

Функціональна надійність НТТС є третьою функціональною вимогою до системи постачання, у виконанні якого зацікавлені всі суб'єкти системи. Як і у випадках з двома попередніми функціональними вимогами, порушення даної вимоги неминуче спричиняє загибель системи або веде до пошуку нових транспортних посередників додатково до старих.

У даному дослідженні розглядаються два показники функціональної надійності:

- ремонтпристосованість, яка визначає властивість системи безперервно транспортувати цільовий продукт споживачам під час проведення ремонтно-профілактичних робіт з метою відновлення технічної надійності конструктивних елементів системи, що втрачається ними в процесі тривалої експлуатації в наслідок зносу або старіння;

- ймовірність безперебійного постачання цільового продукту конкретному споживачеві або групі споживачів протягом певного періоду часу, яка визначає об'єктивну можливість системи відповідати своєму призначенню.

Вказані показники функціональної надійності, методи їх підвищення і методи визначення є *предметом* цього дослідження.

### **1.3. Управління процесами експлуатації та розвитку трубопровідних транспортних систем за критерієм функціональної надійності**

В процесі експлуатації (оперативного управління) та розвитку (стратегічного управління) НТТС першочергове значення має управління поточкорозподілом ЦП. Можливість управляти поточкорозподілом забезпечує раціональну експлуатацію мереж, тобто дозволяє економити матеріальні, трудові, строкові та фінансові ресурси підприємств і організацій, які експлуатують трубопровідну мережу.

Аналогічна ситуація має місце і з управлінням функціональною надійністю НТТС. Особливої актуальності ця проблема набуває для систем з великим терміном експлуатації, коли ризик аварійних збоїв у подачі ЦП споживачам суттєво зростає.

Можливість управління функціональною надійністю у процесі експлуатації та розвитку НТТС дозволяє:

- вибирати в трубопровідній транспортній мережі маршрут постачання ЦП конкретному споживачеві з мінімальними витратами при забезпеченні належної надійності постачання;
- вибирати трубопровідні ділянки й запірну арматуру для проведення ремонтно-профілактичних робіт при дотриманні належної надійності без переривання процесу транспортування ЦП конкретним споживачем.

На жаль, у діючих НТТС не передбачено реалізацію механізму управління функціональною надійністю з чотирьох основних причин [44]:

- немає інженерної методики точного розрахунку даного показника для складних трубопровідних мереж в реальному масштабі часу;
- має місце часовий тренд показників функціональної надійності у бік їх погіршення внаслідок зносу та старіння всіх конструктивних елементів трубопровідної мережі;
- існує недооцінка показника функціональної надійності на етапі проектування і початкових етапах експлуатації з причини малого зносу та відсутності відчутного старіння для всіх конструктивних елементів трубопровідної мережі;
- має місце малий ступінь свободи трубопровідної системи відносно управління функціональною надійністю, що забезпечується зміною положення запірної арматури (оперативне управління), проведенням ремонтно-профілактичних робіт (тактичне управління) або реконструкцією трубопровідної мережі (стратегічне управління).

Безумовно, серед наведених вище причин основною є відсутність інженерної методики розрахунку показника функціональної надійності. Не зважаючи на відсутність строгої методики розрахунку, даний показник інтуїтивно враховується на різних етапах проектування, експлуатації, реконструкції і розвитку НТТС. Інтуїтивне врахування має місце й при управлінні цим показником. Але врахування та зміна функціональній надійності на якісному рівні («гірше» – «краще») не може гарантувати безпомилковість управлінських рішень і забезпечувати ефективність цих рішень для складних НТТС. Тільки точне чисельне визначення функціональної надійності може дозволити якісно вирішувати задачі проектування та реконструкції НТТС, безпомилково і ефективно управляти системами в процесі їх експлуатації.

Важливою причиною, що заважає управлінню функціональною надійністю, є також динаміка показників надійності в процесі експлуатації трубопровідних систем і її недооцінка на початкових стадіях проектування та експлуатації систем. На відміну від інших показників, значення яких є інваріантним по відношенню до терміну експлуатації, значення імовірнісних показників надійності змінюються по експоненціальному закону: на початковому етапі експлуатації вони найбільші, а потім зменшуються в міру зносу і старіння всіх конструктивних елементів НТТС.

Недооцінка надійності НТТС при проектуванні системи та на початкових етапах її експлуатації негативно позначається на функціонуванні системи в пізніші періоди її експлуатації, аж до руйнування системи та зриву планових поставок ЦП.

Остання причина, що негативно позначається на управлінні функціональною надійністю (мала ступінь свободи трубопровідної системи), не є такою критичною, як три попередні. Навіть в умовах малого ступеня свободи НТТС є можливість управляти надійністю чотирма способами:

- *безпосередньо*, оперативно змінюючи структуру мережі за допомогою запірної арматури. Таке управління має сенс, коли при різних структурах мережі основні показники якості мають приблизно однакові значення, а показники надійності різко відрізняються один від одного;

- *безпосередньо*, змінюючи технічну надійність за допомогою проведення ремонтно-профілактичних робіт по відновленню та оновленню окремих елементів системи, що частково втратили надійність або вичерпали свій часовий ресурс. Таке управління потребує певної затримки в часі, обумовленою тривалістю проведення регламентних робіт з відновлення та оновлення ненадійних елементів;

– *безпосередньо*, змінюючи цілеспрямовано структуру трубопровідної мережі за допомогою введення додаткових резервних елементів.

– *побічно*, змінюючи структуру НТТС в процесі її розвитку (введення нових джерел ЦП, прокладка трас до нових споживачів).

Останні два способи відносяться до стратегічного управління і вимагають для своєї реалізації тривалих періодів часу. Проте вони, як правило, дозволяють істотно змінювати показники надійності функціонування НТТС.

Як бачимо, основною умовою для здійснення управління функціональною надійністю в процесі управління та розвитку НТТС є наявність інженерної методики визначення точного значення цієї надійності. Причому розрахунок показників надійності повинен бути орієнтований на реальний масштаб часу. Остання вимога може бути задоволена тільки за наявності швидкодіючих методів розрахунку функціональної надійності з їх подальшою програмною реалізацією.

Таким чином, проблеми управління НТТС зі складною структурою і високою розмірністю (великим числом трубопровідних ділянок) так само, як і проблеми експлуатації та розвитку НТТС з безперервним постачанням ЦП споживачам, упираються в необхідність розробки точних математичних методів оперативного розрахунку функціональної надійності.

#### **1.4. Основні суперечності в процесах експлуатації та розвитку напірних трубопровідних транспортних систем і предмет дослідження**

Напірні трубопровідні транспортні системи є об'єктами, еволюція яких відбувається в часі та просторі. Як і будь-якому об'єкту, що еволюціонує в *часі*, для НТТС характерне старіння, відновлення і оновлення. Як об'єкту, що еволюціонує в *просторі*, – зміна складу і структури мережі, тобто додавання нових і видалення старих просторових і непросторових елементів, підключення нових і відключення колишніх споживачів.

Рушійною силою розвитку НТТС є прагнення всіх суб'єктів системи усунути суперечності, які виникають у процесі її експлуатації. Ці суперечності мають найрізноманітніший характер, мають відношення до різних системних об'єктів і стосуються різних їх сторін. Перерахуємо основні суперечності, які безпосередньо пов'язані з функціональною надійністю НТТС. Це перш за все:

1. Суперечність між загальною протяжністю трубопроводів НТТС і функціональною надійністю системи: чим довше трубопроводи, тим нижче

їх надійність. Оскільки протяжність трубопроводів багато в чому визначає господарську значущість НТТС, то дану суперечність можна розглядати і як суперечність між загальним числом споживачів і функціональною надійністю системи: чим більше споживачів, тим нижче надійність.

2. Суперечність між терміном експлуатації НТТС і функціональною надійністю системи. Чим більший строк експлуатації НТТС, тим нижча функціональна надійність і тим частіше та складніше проведення ремонтно-профілактичних робіт.

3. Суперечність між надійністю НТТС і об'ємами витрат на її досягнення. Чим менше ризик переривання постачань ЦП, тим більше потрібно матеріальних, фінансових і трудових витрат для досягнення належної функціональної надійності. Чим вище ступінь резервування системи, тим складніше і дорожче система.

4. Суперечність між необхідністю проведення ремонтно-профілактичних робіт і вимогою безперервності постачання ЦП споживачеві. Суперечність викликана тим, що основною умовою проведення ремонтно-профілактичних робіт на конкретній ділянці НТТС є припинення транспорту ЦП через цю ділянку і повне його видалення із зони ремонтно-профілактичних робіт.

5. Суперечність між необхідністю визначення точного значення функціональної надійності для цілей оперативного управління і розвитку НТТС і відсутністю універсального аналітичного методу її розрахунку для трубопровідних мереж зі складною топологічною структурою.

Усунення перерахованих суперечностей – це серйозне і складне завдання, що вимагає мобілізації зусиль і ресурсів як науково-дослідних, так і виробничих організацій.

Всі перераховані суперечності по-своєму важливі, тому важко вказати пріоритетність їх усунення. Проте які б заходи щодо усунення суперечностей не проводилися, всі вони пов'язані з підвищенням функціональної надійності системи. А це означає, що проведенню будь-якого заходу з підвищення функціональної надійності системи повинна передувати розробка методу її розрахунку: доцільність будь-яких дій з підвищення функціональної надійності може бути оцінена тільки за наявності науково обґрунтованого методу її розрахунку. Інакше зусилля, спрямовані на вдосконалення системи, можуть привести до негативних наслідків.

Не менш важливим є усунення 4-ї суперечності, яка стосується проведення ремонтно-профілактичних робіт і безперервності постачання ЦП споживачам. Проведення ремонтно-профілактичних робіт дозволяє відновлювати надійність системи, яка втрачається з роками із-за старіння

та аварій. За відсутністю такої можливості (відновлення надійності) система або приречена на руйнування та відмирання, або вимушена на час проведення ремонтно-профілактичних робіт припиняти транспортування ЦП споживачам. Абсолютно очевидно, що з двох НТТС з однаковою поточною функціональною надійністю переважне право на існування (експлуатацію) має та, яка допускає проведення ремонтно-профілактичних робіт без припинення транспортування ЦП як можна більшому контингенту споживачів. В ідеальному випадку система повинна допускати проведення ремонтно-профілактичних робіт на будь-якій ділянці мережі без переривання подачі ЦП хоча би одному споживачеві. Така система найпривабливіша для всіх суб'єктів системи постачання: і виробникам ЦП, і експлуатаційникам, і споживачам.

Останні дві суперечності (4-а та 5-а) є визначальними для даного дослідження. Вони безпосередньо стосуються предмету дослідження – функціональної надійності НТТС. Усунення одного з них дозволяє відновлювати надійність, усунення іншого – визначати її значення, а це означає – оперувати надійністю в процесі вирішення різних задач щодо транспортування та розподілу ЦП в системі постачання.

Можливість проведення ремонтно-профілактичних робіт без порушення постачань ЦП досягається тільки надмірністю структури НТТС і місцями розташування споживачів і джерел ЦП в цій структурі. Як буде показано далі, визначення можливості проведення профілактичних робіт на різних ділянках без припинення транспортування ЦП споживачам і визначення споживачів, які відсікаються від ЦП під час проведення ремонтно-профілактичних робіт, є частковим завданням у задачі визначення функціональної надійності мережі. Тому подальше дослідження буде зосереджено на рішенні саме задачі визначення функціональної надійності мережі відносно конкретних споживачів.

Таким чином, із розглянутих суперечностей, які виникають при експлуатації НТТС і які пов'язані з функціональною надійністю трубопровідної мережі, основною є суперечність між необхідністю оперативного визначення точного значення показників функціональної надійності і відсутністю універсального аналітичного методу розрахунку цього значення для трубопровідних мереж зі складною топологічною структурою. Тому предметом даного дослідження є методи *визначення показників функціональної надійності напірних трубопровідних транспортних систем, а саме: імовірність безперервного постачання ЦП споживачам за певний період часу й ремонтпристосованості.*

Нагадаємо, що показник «ремонтпристосованість» суттєво відрізняється від показника «ремонтпридатність». Ремонтпристосованість – це властивість системи проводити ремонт і

технічне обслуговування ремонтпридатного устаткування або ремонтпридатних фрагментів мережі без переривання постачання ЦП хоча б одному споживачеві. При цьому до місця проведення ремонту та технічного обслуговування ЦП не поступає.

### **1.5. Експлуатація та розвиток напірних трубопровідних транспортних систем з урахуванням їх надійності**

Функціональна надійність грає важливу роль в експлуатації і розвитку НТТС. Розвиток НТТС припускає проектування нових фрагментів мережі, а деколи й повну реконструкцію існуючої мережі. Безумовно, щоб уникнути передчасної загибелі системи та забезпечити її ефективне функціонування (без збоїв в постачанні ЦП споживачеві та аварій в мережі за внутрішніми причинами) всі етапи проектування і функціонування повинні враховувати показники функціональної надійності.

Враховувати показники функціональної надійності повинні всі суб'єкти, які пов'язані з експлуатацією і розвитком НТТС: і проектувальники, і експлуатаційники, і споживачі, і експерти з позаштатних ситуацій. Серед служб експлуатації врахування показників надійності є найбільш важливим для роботи диспетчерської служби, яка протягом робочої зміни часто ухвалює рішення про зміну мережної структури системи.

Необхідність в зміні структури виникає кожного разу, коли:

- вводять в мережу новий конструктивний елемент трубопровідної мережі (трубопровідна ділянка, запірна арматура і т. і.) або виводять старий;
- додають нове джерело ЦП або відмовляються від старого;
- включають додатковий насосний агрегат або відключають той, що діє;
- підключають до трубопровідної мережі нового споживача або відключають колишнього;
- замінюють застарілі та зношені конструктивні елементи трубопровідної мережі на нові;
- ставлять аварійно-ремонтну зону на профілактику або вводять її в експлуатацію після завершення профілактики.

Перераховані регламентні ситуації слід доповнити і позаштатними ситуаціями, що виникають як з внутрішніх причин (наприклад, розрив труби внаслідок старіння), так і зовнішніх (наприклад, пошкодження внаслідок проведення будівельних робіт або землетрусів).

При виникненні аварії диспетчер зобов'язаний прийняти оперативні заходи щодо її локалізації і усунення. Ці заходи пов'язані із зміною структури мережі, оскільки аварійні ділянки повинні бути виведені з експлуатації на час усунення аварії. Виведення аварійних ділянок з експлуатації супроводжується видаленням ЦП або його носія з аварійної зони.

Будь-яка зміна структури НТТС спричиняє й зміну функціональної надійності системи. Якщо при цьому надійність опускається нижче мінімально допустимого рівня, виникає додаткова загроза катастрофи із-за порушення постачань ЦП підприємствам-споживачам з безперервним циклом виробництва. Щоб загроза не переросла в реальну катастрофу, диспетчер повинен забезпечити як проведення ремонтних робіт на аварійній ділянці, так транспортування ЦП всім споживачам мережі при відключеній зоні з пошкодженою ділянкою. Мережі з високою структурною надмірністю, як правило, дозволяють диспетчерові справитися з цим завданням. Більш того, багато мереж дозволяють вирішити таку задачу декількома способами. При існуючих підходах вибору структури для подальшого функціонування мережі диспетчер керується критерієм мінімуму сумарних надмірних напорів у вузлах мережі. З погляду миттєвої ефективності функціонування системи, даний критерій цілком виправданий. Проте не можна ігнорувати можливі зміни функціональній надійності. Особливо це стосується функціональної надійності щодо споживачів з безперервним циклом споживання ЦП. Щоб під час ліквідації аварії уникнути різкого падіння функціональної надійності або максимально понизити ризик збоїв у постачаннях ЦП, треба вибір можливого варіанту структури здійснювати з урахуванням надійності. Найбільш переважним варіантом є той, який забезпечить допустиму функціональну надійність щодо всіх споживачів мережі. Якщо такого не знайдеться, слід вибрати варіант, що забезпечує допустиму функціональну надійність щодо споживачів з безперервним циклом споживання. Якщо й такого варіанта не буде, то слід вибрати варіант з найменшим падінням функціональної надійності.

На жаль, диспетчери позбавлені можливості вибирати структуру мережі з урахуванням її функціональної надійності через відсутність інженерної методики та програмного інструментарію для чисельного визначення показників функціональної надійності трубопровідних мереж зі складною структурою. Відсутність методики розрахунку показників надійності для складних трубопровідних мереж негативно позначається на організації робіт з усунення аварій. Без точного розрахунку надійності неможливо кваліфіковано розставити пріоритети для робіт з усунення аварій, що виникли одночасно, тому що неможливо визначити, усунення



якої аварії забезпечує найбільш вагоме збільшення надійності системи в цілому або надійності постачання цільового продукту окремим споживачам.

Експлуатація НТТС передбачає великий об'сяг робіт з реновації трубопроводів – профілактиці й відновлення фізично зношених ділянок. Для організації реноваційних робіт велике значення має точний розрахунок надійності, який дозволяє не тільки виявити ненадійні фрагменти трубопровідних мереж, а й кваліфіковано скласти графік проведення профілактичних робіт.

Особливу роль розрахунок функціональної надійності грає при проектуванні нових або реконструкції вже існуючих мереж. Тільки точний розрахунок дозволяє дати відповідь на запитання:

- який з варіантів зміни структури мережі за критерієм надійності є переважним і наскільки переважним;
- які фрагменти мережі вимагають реконструкції через недостатню надійність;
- у якому місці доцільно підключати нового споживача до мережі, щоб забезпечити для нього необхідну надійність постачання ЦП.

Таким чином, показники технічної і функціональної надійності мають суттєве значення на різних етапах експлуатації та розвитку НТТС. Проте для систем зі складною мережною структурою ці показники або враховуються на інтуїтивному рівні, або не враховуються взагалі через відсутність методів їх визначення. Отже процеси функціонування НТТС мають певний ресурс (урахування функціональної надійності), використання якого дозволить підвищити ефективність системи на всіх етапах її проектування та експлуатації як з погляду досягнення кінцевої мети (постачання цільового продукту всім споживачам у заданій кількості та заданої якості), так і з погляду екологічної безпеки.

## 1.6. Цілі дослідження

*Метою наукових досліджень*, покладених в основу цієї монографії, є теоретичне обґрунтування та розвиток методів підвищення й визначення показників функціональної надійності трубопровідних транспортних систем зі складною мережною структурою, а також розробка інженерної методики чисельного визначення цих показників при експлуатації та розвитку таких систем. Мета повністю відповідає основним положенням всіх програм з подальшого розвитку систем тепло-, газо- і водопостачання регіонів, зокрема крупних міст України і відповідним ухвалам Кабінету міністрів України.

Досягнення поставленої мети дозволить використовувати неврахований ресурс (функціональну надійність) на різних етапах розвитку НТТС, в тому числі:

- *проектувальникам* НТТС:
  - при конструюванні мережних систем із заданими показниками функціональної надійності;
  - для порівняння проектів нових НТТС за критерієм функціональної надійності;
  - для оптимізації мережних структур за критерієм функціональної надійності;
  - при здійсненні реконструкції та розвитку діючих НТТС з урахуванням показників функціональної надійності;
- *експлуатаційникам* НТТС:
  - для забезпечення експлуатації мережних систем із заданими показниками функціональної надійності;
  - при необхідності управління показниками функціональної надійності;
  - для укладення договорів із споживачами з урахуванням показників функціональної надійності;
  - при складанні технічних завдань і технічних умов на реконструкцію і розвиток діючих НТТС з урахуванням показників функціональної надійності, що надаються проектним організаціям;
  - для видачі аварійно-ремонтним і відновно-профілактичним службам технічних завдань і технічних умов проведення ремонтних і профілактичних робіт з урахуванням показників функціональної надійності;
  - при розробці планів ремонтно-профілактичних робіт з урахуванням показників функціональної надійності;
- *експлуатаційникам і споживачам* НТТС:
  - при аналізі поточних і прогнозі майбутніх станів НТТС з урахуванням показників функціональної надійності;
- *споживачам* НТТС:
  - при виборі місця підключення споживачів до трубопровідної мережі з урахуванням показників функціональної надійності;
  - для укладення договорів з постачальниками ЦП з урахуванням показників функціональної надійності;
- *експертам* МНС:

- при перевірці дотримання допустимих норм з функціональної надійності в процесі експлуатації НТТС з метою забезпечення екологічної безпеки та попередження можливих екологічних катастроф;
- для здійснення аналізу стану НТТС при розслідуванні причин катастрофи з урахуванням показників функціональної надійності.

Якщо поставлені цілі будуть досягнуті, то експлуатація і розвиток НТТС прийме абсолютно новий характер – структура мережі зі складного та незручного «ворога» проектувальників і експлуатаційників перетвориться на «союзника», який дозволить нормалізувати роботу і тих, і інших, підвищити якість проектування та ефективність експлуатації.

### **1.7. Огляд існуючих методів розрахунку надійності напірних трубопровідних транспортних систем**

Напірні трубопровідні транспортні системи є складними й занадто дорогими інженерними спорудами, розвиток і експлуатація яких пов'язана з невизначеностями різного роду. Так, експлуатаційне навантаження на мережу залежить від метеоумов, часу доби, невиробничих втрат, змінного характеру споживання ЦП більшістю споживачів. Розвиток мережі залежить від демографічних змін, розширення географії споживачів, зростання об'ємів споживання, наявності й розмірів фінансових трудових і матеріальних ресурсів. У свою чергу, невиробничі втрати залежать від: темпів зносу й старіння всіх конструктивних елементів системи; непередбаченого втручання зовнішнього середовища (пошкодження, аварії, катастрофи) на працездатність системи в цілому або її окремих елементів; якості ремонтно-профілактичних робіт та інших причин.

Невизначеності функціонування НТТС як внутрішньої природи, так і зовнішньої, ускладнюють визначення і навіть оцінку поточного стану системи, що служить додатковим несприятливим чинником для її експлуатації та розвитку.

У зв'язку з високою невизначеністю стану НТТС показники надійності, як правило, мають імовірнісний характер. Виключенням, мабуть, можна вважати такі показники надійності, як ремонтпридатність і ремонтпристосованість, оскільки дані показники дозволяють з повною визначеністю вказати, які елементи мережі допускають проведення ремонтно-профілактичних робіт, а які при цьому не спричиняють переривання поточного постачання ЦП споживачам.

У роботах Е. М. Гальперіна [11], Ю. О. Ільїна [20-21], О. О. Іоніна [22-23] пропонуються самі різні показники, які використовуються для оцінки надійності. Всі вони поділяються на:

- *відносні показники*, що відображають відносний час перебування

системи в справному стані; стані з одним, двома непрацездатними ділянками; ступінь ремонтпристосованості; відносне число працездатних елементів мережі та ін.;

– *імовірнісні показники* надійності, що характеризують надійність мережі в цілому, надійність окремих ділянок або фрагментів мережі, ймовірність безперебійного отримання продукту протягом певного періоду часу всіма споживачами одночасно або кожним конкретним споживачем окремо та інші.

Середнє значення багатьох відносних показників при нескінченно великому числі накопичених і оброблених даних перетворюються на імовірнісні показники. Тому в роботах С. С. Душкіна і І. О. Краєва [14], В. А. Петросова [35] показники надійності поділяються не за формою подання, а за їх смисловим значенням. Такими показниками є:

– імовірність безвідмовної роботи системи або окремих її елементів протягом певного періоду часу;

- напрацювання на відмову;
- довговічність;
- середній ресурс;
- гамма-відсотковий ресурс;
- призначений ресурс;
- ремонтпридатність;
- відновлюваність.

З перерахованих показників виділимо два: ремонтпридатність і ймовірність безвідмовної роботи елементів протягом заданого періоду часу. Нагадаємо, що імовірність безвідмовної роботи – це основний показник технічної надійності елементів.

Перший показник важливий і цікавий за наступними причинами:

– тільки за умови ремонтпридатності конструктивних елементів можливі ремонтно-профілактичні роботи з відновлення їх технічної надійності, що втрачається у процесі експлуатації;

– тільки за умови ремонтпридатності конструктивних елементів є можливість підвищувати такі показники функціональної надійності системи, як імовірність безперебійного постачання ЦП споживачам і ремонтпристосованість системи.

Підвищений інтерес до другого показника викликаний тим, що він забезпечує методи розрахунку показника функціональної надійності (ймовірності безперебійного постачання) дуже важливою початковою інформацією – технічною надійністю окремих структурних елементів трубопровідної мережі. Для визначення цього показника розроблений ряд

методів (блоки без фону на рис. 1.3).

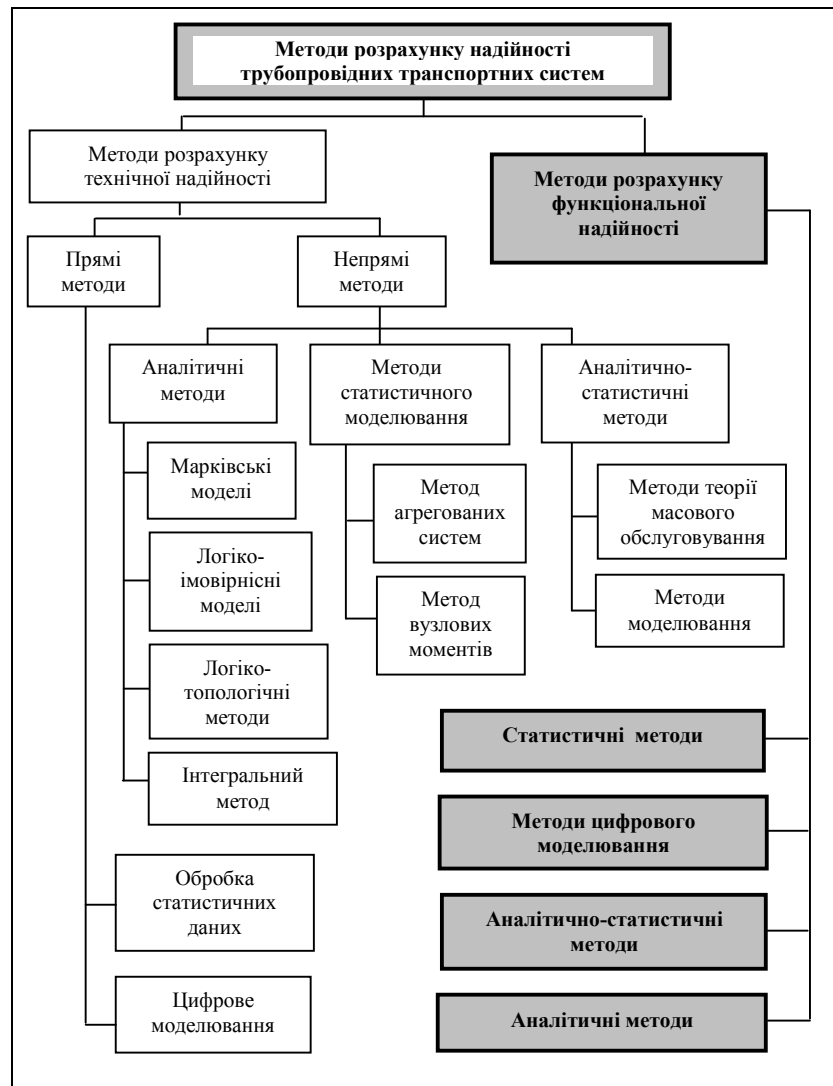


Рис. 1.3 – Класифікація методів розрахунку надійності трубопровідних транспортних систем

Існуючі підходи до вирішення задач визначення і аналізу технічної надійності НТТС базуються на застосуванні прямих і непрямих методів розрахунку надійності. Докладний огляд методів з погляду врахування структури систем, а отже, і можливості вирішення задач експлуатації і розвитку НТТС, у тому числі й проектування абсолютно нових систем, наводиться в [44].

Відзначимо, що найбільш прийнятними для проектування нових і розвитку існуючих НТТС є аналітичні методи, оскільки всі статистичні методи не в змозі враховувати структуру системи, яка ще не перебувала в експлуатації. У свою чергу, використання аналітичних методів для складно

структурованих систем, що мають у своєму складі мостові з'єднання, не забезпечує розробників систем достатньо точними результатами. Так, пропонується в [35, с. 150-151] метод заміни мостового з'єднання з рівноважними плечима паралельним з'єднанням дає тільки приблизний результат.

На рис. 1.3, окрім класифікації методів визначення технічної надійності, показана класифікація методів розрахунку функціональної надійності (блоки з сірим фоном). Визначенню функціональної надійності трубопровідних систем присвячено менше робіт. Серед них слід зазначити роботи [7-10, 36-39, 42-50], які безпосередньо або побічно зачіпають проблему розрахунку функціональної надійності.

З наведеної класифікації виходить, що всі методи розрахунку функціональної надійності можна розділити на статистичні, аналітико-статистичні, аналітичні і методи цифрового моделювання.

Статистичні методи засновані на обробці даних експлуатації існуючих НТТС. Статистичні методи дозволяють набути найбільш точних значень функціональної надійності конкретної НТТС. Загальним недоліком статистичних методів є необхідність тривалого накопичення інформації про поведінку системи. Чим більше період спостереження і об'єм оброблених даних, тим точнішим виходить розрахунок функціональної надійності. Іншим серйозним недоліком статистичних методів є неможливість використання результатів статистичної обробки даних одних систем для отримання хоча би оцінки функціональної надійності для інших систем, особливо при відмінностях в їх топологічній структурі й складі. Останній недолік виключає використання статистичних методів для проектування нових і розвитку існуючих НТТС з урахуванням функціональної надійності.

Методи цифрового моделювання засновані на побудові цифрової моделі трубопровідних мереж, що проектуються або реконструюються, і віртуальної імітації їх функціонування з подальшою статистичною обробкою даних про поведінку моделі. Методи цифрового моделювання НТТС дозволяють значно скоротити час розрахунку показників надійності. Цифрове моделювання припускає:

- задання цифрової моделі системи з використанням генераторів випадкових чисел, які імітують появу аварійних пошкоджень в мережі в часі і просторі за рівномірним або експоненціальним законами розподілу;
- задання експоненціальних функцій розподілу для старіння і зносу різних елементів трубопровідної мережі з подальшою побудовою цифрового графіка проведення ремонтних-профілактичних робіт;

- управління масштабом часу для прогнозування показників надійності після завершення будь-якого наперед заданого періоду експлуатації;
- програмну реалізацію статистичних методів розрахунку, заснованих на обробці віртуальних даних про поведінку моделі.

Основний недолік методів цифрового моделювання – необхідність розробки цифрової моделі для кожної НТТС. Причина та ж – статистичні методи розрахунку віртуальних даних, що обробляються під час обчислювальних експериментів, не пов'язані із структурою системи, а тому не можуть бути поширені на НТТС із структурою, відмінною від структури моделі.

Не зважаючи на недоліки, методи цифрового моделювання грають виключно важливу роль для доведення справедливості аналітико-статистичних і аналітичних методів. Цифрове моделювання дозволяє організовувати обчислювальні експерименти для перевірки адекватності будь-яких математичних моделей, у тому числі і моделей, отриманих аналітико-статистичними або аналітичними методами для розрахунку функціональної надійності НТТС.

Аналітико-статистичні методи припускають використання статистичних методів обробки даних для структурних елементів і фрагментів мережі, надійність яких не залежить від структури мережі. Для остаточного розрахунку функціональної надійності мережі використовуються аналітичні підходи.

Аналітичні методи, що виключають на будь-якій стадії розрахунку функціональної надійності будь-яку обробку накопиченої інформації про поведінку НТТС, є найбільш переважними для вирішення завдань проектування і розвитку НТТС. Дані методи забезпечують високу точність розрахунків і дозволяють досліджувати залежність функціональної надійності від різних суттєвих чинників і умов функціонування на будь-яких інтервалах часу. У разі програмної реалізації аналітичні методи дозволяють отримувати результати практично в масштабі реального часу. При цьому час рахунку значно менше часу введення початкових даних про структуру мережі та технічну надійність її елементів. Результати аналітичних методів, безумовно, повинні відповідати результатам статистичної обробки даних в методах цифрового моделювання. На цій відповідності засновані обчислювальні експерименти з перевірки адекватності математичних моделей, отриманих за допомогою аналітичних методів.

Використання аналітичних методів вимагає математичного опису (математичній моделі) НТТС. Математична модель мережі складається за

умови повної паспортизації мережі НТТС. Обов'язково паспортні дані мережі повинні включати інформацію про склад і структуру трубопровідної мережі, про технічні параметри всіх елементів мережі, і в першу чергу – про запірну арматуру і трубопровідні ділянки. Паспортні дані повинні містити відомості про технічну надійність різних елементів мережі (наприклад, засувки) або дозволяти розраховувати технічну надійність за простими формулами (наприклад, трубопровідних ділянок).

Необхідність паспортизації мережі – основний недолік аналітичних методів. Але паспортизація проводиться не спеціально для розрахунку функціональної надійності мережі. Це загальна умова для нормальної експлуатації і розвитку мережі. Будь-яке транспортне або комунальне підприємство, що експлуатує трубопровідну мережу, повинне мати вичерпну інформаційну базу про структуру, склад і характеристики мережі й підтримувати її повноту і достовірність протягом всього періоду експлуатації мережі.

### **1.8. Висновки та завдання дослідження**

Аналіз існуючих методів розрахунку функціональної надійності НТТС дозволяє зробити наступні висновки:

- статистичні методи, які забезпечують найбільш адекватні оцінки технічної та функціональної надійності незалежно від складності та розмірності мереж, вимагають дуже великих строкових витрат для їх реалізації та непридатні для проектування нових мереж зі складною структурою;
- аналітичні методи, які здатні при визначенні показників надійності враховувати структуру мережі, не забезпечують належної адекватності і практично непридатні для оцінки надійності складних магістральних і розподільних мереж;
- аналітико-статистичні методи мають недоліки, які властиві як статистичним (потреба великих строкових витрат на збір статистичних даних), так і аналітичним методам (непридатність для НТТС з високої розмірністю і структурною складністю мереж), тому їх використання малоперспективне;
- для проведення в НТТС ремонтно-профілактичних робіт без переривання постачання ЦП споживачам з метою відновлення технічної надійності конструктивних елементів трубопровідної мережі останні повинні володіти властивістю ремонтпридатності, а сама система – властивістю ремонтпристосованості, яка досягається тільки структурною надмірністю мережі;



— через ідентичність математичних моделей розподільних і магістральних мереж всі аналітичні методи, що використовуються для розрахунку технічної або функціональної надійності розподільних мереж, можуть бути з успіхом використані для аналогічних розрахунків магістральних мереж і навпаки.

Зроблені висновки висувають вимоги щодо удосконалення існуючих аналітичних методів розрахунку функціональної надійності НТТС. Перш за все, удосконалення методів повинне бути направлене на:

- підвищення адекватності результатів розрахунку;
- універсалізацію методів по відношенню до складності й розмірності мереж;
- розширення сфери використання методів, зокрема узагальнення методів розрахунку функціональної надійності розподільних НТТС на розрахунок надійності магістральних НТТС і навпаки;
- забезпечення оперативності методів розрахунку на випадок екстреної зміни структури мережі або параметрів її окремих елементів, що суттєво впливають на надійність всієї системи;
- можливість визначення ремонтопристосованості НТТС;
- можливість визначення ступеня резервування постачання ЦП конкретним споживачем.

Вдосконалення методів не повинне впливати на їх здатність вести розрахунки функціональної надійності в реальному масштабі часу як для завдань експлуатації та розвитку мереж, так і проектування абсолютно нових.

Для реалізації вимог щодо удосконалення існуючих аналітичних методів розрахунку функціональної надійності НТТС, а також для досягнення мети дослідження, визначено наступні завдання дослідження:

1. Розробка аналітичного методу підрахунку відносного часу, протягом якого споживач розподільних НТТС отримує ЦП і який враховує структуру мережі й надійності її окремих елементів. Іншими словами, розробка методу розрахунку надійності постачання ЦП конкретному споживачеві в реально існуючих або проєктованих комунальних трубопроводних мережах.

2. Узагальнення розробленого методу на визначення функціональної надійності магістральних НТТС.

3. Демонстрація практичної доцільності та ефективності застосування розробленого методу розрахунку функціональної надійності при аналізі різних конструкцій магістральних трубопроводів.

4. Визначення перспективних напрямів для подальшого розвитку теорії функціональної надійності напірних трубопровідних систем.

Наведений перелік є змістовною, або вербальною, постановкою задач даного дослідження.

Вирішення перерахованих завдань дозволить на всіх етапах експлуатації та розвитку напірних трубопровідних систем здійснювати чисельний розрахунок і врахування показників їх функціональної надійності.

## **РОЗДІЛ 2**

### **РОЗРАХУНОК ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАДІЙНОСТІ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ АВАРІЙНО-РЕМОНТНИХ ЗОН**

Структура напірної трубопровідної транспортної системи (НТТС) суттєво впливає на показники функціональної надійності, тобто на здатність системи вирішувати своє основне завдання – безперервно транспортувати цільового продукту (ЦП) споживачеві. Серед НТТС систем з рівними технічними параметрами трубопроводів найвищою функціональною надійністю володіють ті, структура яких забезпечує більшу чисельність альтернативних маршрутів транспортування ЦП від джерел до кожного споживача. Проте протяжність маршрутів транспортування негативно позначається на функціональній надійності системи: чим довше маршрут, тим нижче надійність.

Виявлення та врахування залежності функціональної надійності системи від її структури грає важливу роль в проектуванні, експлуатації та розвитку НТТС. Для успішного вирішення завдань проектування НТТС, раціональної експлуатації і вибору оптимального варіанту розвитку існуючих НТТС необхідний метод розрахунку функціональної надійності, який би з високою адекватністю дозволяв розраховувати ймовірність безперервного транспортування ЦП від джерела до споживача. Метод повинен враховувати як протяжність трубопроводів, так і будь-яку особливість структури трубопровідної системи, що впливає на шукану функціональну надійність.

Трубопровідна транспортна мережа найбільш важлива та найбільш складна частина НТТС, що здійснює транспортування та розподіл ЦП. Фактично, розрахунок функціональної надійності трубопровідної транспортної системи зводиться до розрахунку функціональної надійності розподільної трубопровідної мережі. Це означає, що розрахунок проводиться без урахування активних джерел і в умовах невизначеності у відборі ЦП споживачами.

Серед існуючих розрахункових методів функціональної надійності НТТС найбільш перспективним є аналітичний метод, теоретичні основи якого детально викладені в [44]. Метод вдало враховує просторову структуру й поточний технічний стан НТТС, а результатом розрахунку є

конкретне значення (не оцінка) функціональної надійності на розрахунковий період експлуатації системи.

В основу методу покладено розбиття НТТС на аварійно-ремонтні зони (АРЗ) і заміни структури НТТС макроструктурою АРЗ, яка повністю успадковує функціональну надійність системи. З цієї причини надалі даний аналітичний метод розрахунку функціональної надійності НТТС називатимемо методом АРЗ.

Розглянемо основні положення методу АРЗ. Для спрощення і конкретизації кожного етапу в методі АРЗ за об'єкт застосування візьмемо водопровідну НТТС, хоча немає ніяких принципових причин для їх особливого виділення з множини існуючих напірних трубопровідних мережних систем.

Метод АРЗ складається з семи послідовних етапів [44]:

1. Формування математичної моделі трубопровідної транспортної мережі зі складною топологічною структурою у вигляді зваженого графа.
2. Розбиття початкового зваженого графа трубопровідної мережі на підграфи (макроеlementи), кожен з яких відповідає одній АРЗ.
3. Розрахунок технічної надійності АРЗ як незалежного макроеlementа у функціонуванні НТТС.
4. Перетворення початкового зваженого графа мережі великої розмірності в зважений макрограф АРЗ малої розмірності (заміна мікрографа кожної АРЗ однією вершиною).
5. Побудова спрощеного макрографа АРЗ відносно конкретного споживача трубопровідної мережі.
6. Побудова розрахункової моделі функціональної надійності трубопровідної мережі відносно конкретного споживача.
7. Формування математичної моделі функціональної надійності мережі відносно конкретного споживача за допомогою класичних методів теорії надійності технічних систем і безпосередній розрахунок функціональної надійності.

Розглянемо докладно кожний з наведених етапів з паралельною ілюстрацією його на конкретному прикладі.

## **2.1. Формування математичної моделі напірної трубопровідної транспортної мережі**

Математична модель, яка однозначно описує напірну трубопровідну транспортну систему (НТТМ) і потім використовується для подальшого вирішення завдання побудови математичної моделі функціональної надійності трубопровідної мережі, має вигляд

$$G[z, l, \lambda, \mu, p] = (V, E; z, l, \lambda, \mu, p), \quad (2.1)$$

де  $V$  – множина вершин графа, що відповідають водопровідним колодязям, джерелу живлення і споживачам;  $E$  – множина ребер графа, що відповідають реальним трубопроводним ділянкам;  $z, l, \lambda, \mu, p$  – вагові функції на ребрах графа, що відповідають визначальній наявності та розташуванню запірної арматури на кожній трубопроводній ділянці, довжину цієї ділянки, інтенсивність зносу та інтенсивність відновлення ділянки, технічну надійність запірної арматури на ділянці, якщо вона є..

У загальному випадку граф (2.1) не є орієнтованим. У завданнях, пов'язаних з проектуванням і експлуатацією НТТС, орієнтація графа служить для вказівки напрямку транспорту ЦП на кожній трубопроводній ділянці. При розрахунку функціональної надійності постачання ЦП споживачам інформація про напрям руху ЦП не використовується, тобто функціональна надійність інваріантна відносно напрямку транспорту ЦП. При необхідності напрям ЦП на кожній ділянці в проектованих і експлуатованих мережах визначають за допомогою гідравлічного розрахунку [15–16,19], який проводять до початку розрахунку функціональної надійності.

Конкретизуємо склад і призначення всіх елементів математичної моделі (2.1).

Покладемо, що множина вершин визначається виразом

$$V = \{v_i\}_1^n. \quad (2.2)$$

Тоді множина дуг визначиться виразом

$$E = \{e_{ij} = (v_i, v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j\}. \quad (2.3)$$

Математичний опис множини всіх засувок і їх розташування на трубопроводі здійснюється за допомогою вагової функції  $z$  на множині  $E$ , яка відображає його на множину  $\{0,1,2,3\}$  за правилом  $z(e_{ij}) = z_{ij}$ , причому

$$z_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо ребру } e_{ij} \text{ відповідає трубопровід без засувки;} \\ 1, & \text{якщо ребру } e_{ij} \text{ відповідає трубопровід із засувкою} \\ & \text{в колодязі } v_i; \\ 2, & \text{якщо ребру } e_{ij} \text{ відповідає трубопровід із засувкою} \\ & \text{в колодязі } v_j; \\ 3, & \text{якщо ребру } e_{ij} \text{ відповідає трубопровід з двома засувками.} \end{cases} \quad (2.4)$$

Ще чотири вагові функції вводять для вказівки параметрів трубопроводів, що впливають на результати розрахунку надійності постачання ЦП конкретним споживачам, а саме:

– функція відстані  $l$ , що відносить кожній дузі  $e_{ij} \in \mathbf{E}$  дійсне число  $l(e_{ij}) > 0$  як параметр довжини відповідного трубопроводу;

– функція інтенсивності відмов  $\lambda$ , що відносить кожній дузі  $e_{ij} \in \mathbf{E}$  дійсне число  $\lambda(e_{ij}) > 0$ , яке фіксує значення параметра інтенсивності відмов відповідного трубопроводу;

– функція інтенсивності відновлення  $\mu$ , що відносить кожній дузі  $e_{ij} \in \mathbf{E}$  дійсне число  $\mu(e_{ij}) > 0$ , яке фіксує значення параметра інтенсивності відновлення відповідного трубопроводу після його виходу з ладу;

– вагова вектор-функція технічної надійності запірної арматури  $\mathbf{p}$ , що відносить кожній дузі  $e_{ij} \in \mathbf{E}$ , двокомпонентний вектор-рядок  $\mathbf{p}_{ij}^T = [p^-(e_{ij}) \ p^+(e_{ij})]$ , елементами якого є імовірність безвідмовної роботи запірної арматури, розташованої на початку й кінці відповідного трубопроводу, причому

$$\mathbf{p}_{ij}^T = \begin{cases} [1 \ 1], & \text{якщо } z(e_{ij}) = 0; \\ [p^-(e_{ij}) \ 1], & \text{якщо } z(e_{ij}) = 1; \\ [1 \ p^+(e_{ij})], & \text{якщо } z(e_{ij}) = 2; \\ [p^-(e_{ij}) \ p^+(e_{ij})], & \text{якщо } z(e_{ij}) = 3. \end{cases} \quad (2.5)$$

Аргументами  $p^-(e)$  і  $p^+(e)$  функції (2.5), будучи ймовірностями, являють собою дійсні числа з діапазону від 0 до 1. Аргумент  $p^-(e)$  визначає ступінь зносу і стан запірної арматури, що знаходиться на початку трубопроводу, аргумент  $p^+(e)$  – в кінці трубопроводу. За

відсутністю запірної арматури на будь-якому кінці трубопроводу відповідні аргументи функції (2.5) дорівнюють одиниці.

Вирази (2.1) – (2.5) утворюють математичну модель трубопровідної мережі для вирішення завдань, пов'язаних з побудовою математичних моделей функціональної надійності залежно від топологічної структури трубопровідної мережі.

Наявність математичної моделі для конкретної трубопровідної транспортної мережі є необхідною умовою для програмної реалізації процедури розбиття початкового графа мережі на аварійно-ремонтні зони, побудови макрографа мережі (графа АРЗ) і обчислення технічної надійності кожної зони.

Сформуємо математичну модель для конкретної трубопровідної мережі, яка входить до складу системи, зображеної у вигляді графа на рис. 2.1. Дана мережа буде використана як приклад для всіх подальших етапів методу АРЗ.

Трубопровідна транспортна мережа живиться від одного активного джерела  $O_d$  і забезпечує цільовим продуктом чотирьох споживачів:  $O_{c1}$ ,  $O_{c2}$ ,  $O_{c3}$  і  $O_{c4}$ .

Сама трубопровідна транспортна мережа має дев'ятнадцять колодязів (вершини графа з номерами від 1 до 19), дев'ятнадцять засувок з позначенням  $a_i$ ,  $i = \overline{1,19}$ , і дев'ятнадцять трубопровідних ділянок (ребра графа) з позначенням  $t_i$ ,  $i = \overline{1,19}$ . Кожна засувка в трубопровідній транспортній мережі умовно зображена на схемі поза колодязем – поряд з вузлом, у відповідному колодязі якого реально розташована та або інша засувка.

Трубопровідна система, що зображена на рис. 2.1, нагадує систему з аналогічного прикладу в [49, с.15]: ті ж самі споживачі, джерело та відстані між ними. Але трубопровідна мережа зазнала суттєвих змін. Усі споживачі зараз охоплені кільцем з трубопроводів  $t_1, t_3, t_5, t_{11}, t_{15}, t_{17}, t_{13}, t_9, t_7, t_4$  та  $t_2$ . Така конструкція мережі забезпечує стовідсоткову пристосованість системи до ремонту – кожна трубопровідна ділянка може бути вилучена з процесу транспортування ЦП без переривання поставки продукту будь-якому споживачеві.

Вибір прикладу обумовлений прагненням авторів довести корисність методу АРЗ для порівняння між собою різних проектів трубопровідних мереж, а також довести його здатність надавати точні значення (не оцінки) розбіжності порівняльних параметрів. Це дозволяє визначити кількісно переваги й недоліки порівняльних мереж.

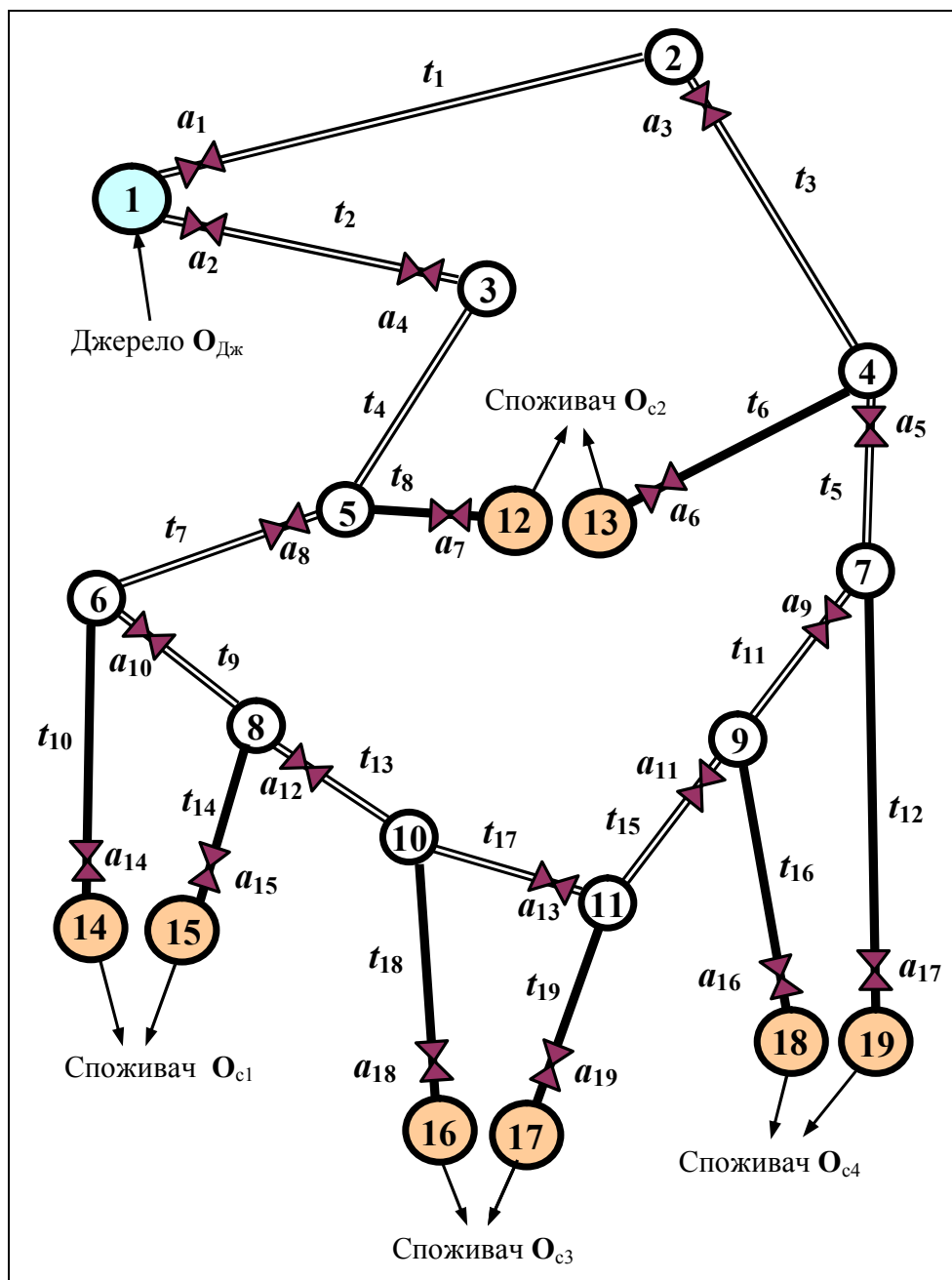


Рис. 2.1 – Схема трубопровідної транспортної системи

Згідно з (2.1), математична модель для даної трубопровідної транспортної мережі визначається графом

$$G[z, l, \lambda, \mu, p] = (V, E; z, l, \lambda, \mu, p). \quad (2.6)$$

Тут  $V = \{v_i\}_1^{15} = \{1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19\}$  – множина вершин;  $E = \{e_{ij} = (v_i, v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, \ i \neq j\} = \{(1 \ 2)(1 \ 3)(2 \ 4)$



(3 5)(4 7)(4 13)(5 6)(5 12)(6 8)(6 14)(7 9)(7 19)(8 10)(8 15)(9 11)(9 18)(10 11)(10 16)(11 17) } – множина ребер. Значення вагових функцій  $z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}$  на ребрах графа задані в табличній формі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Завдання вагових функцій зваженого графа мережі

№	Ребро $e_{ij} = (v_i, v_j)$	Вагова функція, [од. виміру]				
		$z(e_{ij})$	$l(e_{ij}), [\text{км}]$	$\lambda(e_{ij}), [\text{км}^{-1} \text{год}^{-1}]$	$\mu(e_{ij}), [\text{год}^{-1}]$	$\mathbf{p}^T(e_{ij})$
1	(1 2)	1	18	0,20	1 / 0,01	[ 0,99 1 ]
2	(1 3)	3	17	0,20	1 / 0,01	[ 0,99 0,99]
3	(2 4)	1	7	0,26	1 / 0,007	[ 0,99 1 ]
4	(3 5)	0	8	0,26	1 / 0,007	[ 1 1 ]
5	(4 7)	1	4	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 1 ]
6	(4 13)	2	4,4	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
7	(5 6)	1	2	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 1 ]
8	(5 12)	2	0,4	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
9	(6 8)	1	1	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 1 ]
10	(6 14)	2	0,7	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
11	(7 9)	1	0,7	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 1 ]
12	(7 19)	2	0,4	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
13	(8 10)	1	2	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 1 ]
14	(8 15)	2	0,5	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
15	(9 11)	1	0,2	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 1 ]
16	(9 18)	2	0,5	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
17	(10 11)	2	1	0,26	1 / 0,007	[ 1 0,98]
18	(10 16)	2	0,9	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
19	(11 17)	2	0,2	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]

Номер за порядком з табл. 2.1 зручного використовувати як індекс в позначці ребра графа  $t_i, i = \overline{1,19}$ .

Треба додати, що загальна протяжність трубопроводів в новому прикладі збільшилася в порівнянні з протяжністю трубопроводів у

прикладі [49, с.15]: була 58,8 км, і тепер становить 68,9 км. Проте очікується, що функціональна надійність закільцьованої мережі відносно будь-якого споживача не погіршиться. Остаточний висновок стосовно значень показників функціональної надійності можна зробити тільки після виконання всіх етапів розрахунку за методом АРЗ.

## **2.2. Розбиття напірної трубопровідної транспортної мережі на аварійно-ремонтні зони**

Аварійно-ремонтна зона (АРЗ) – це частина трубопровідної транспортної мережі. Для будь-якої АРЗ справедливі такі висловлення:

- у випадку виникненні аварії або необхідності проведення ремонтний-профілактичних робіт на будь-якій трубопровідній ділянці зони без доступу ЦП до місця робіт решта всіх трубопровідних ділянок і споживачів цієї зони вимушено відсікаються запірною арматурою від джерела ЦП;

- АРЗ відносно будь-якої своєї трубопровідної ділянки є мінімально можливою зоною, що відсікається запірною арматурою, від всієї трубопровідної мережі з гарантованим припиненням доступу ЦП від джерела до цієї ділянки;

- у процесі експлуатації трубопровідної транспортної мережі всі споживачі однієї й тієї ж зони мають рівну можливість отримувати ЦП: у кожен період часу вони всі або отримують ЦП, або не отримують;

- працездатність конструктивних елементів (трубопровідних ділянок, колодязів, запірної арматури та ін.) однієї АРЗ не залежить від працездатності конструктивних елементів інших АРЗ.

Останній вислів жодним чином не стосується запірної арматури, переведення якої в стан «закрито» перешкоджає доступу ЦП в АРЗ. Таку запірну арматуру називатимемо *суттєвою*. Термін «*суттєва*» говорить про те, що відповідна запірна арматура грає суттєву роль у вирішенні виробничої задачі припинення доступу ЦП в одну з АРЗ й вирішенні аналітичної задачі розрахунку функціональної надійності мережі щодо споживачів цієї ж зони.

Задання множини вершин  $V$  (2.2), множини ребер  $E$  (2.3) та ваговій функції  $z$  на множині  $E$  (2.4) дозволяє здійснити однозначне розбиття початкового графа мережі  $G$  (2.1) на підграфи функціонально незалежних АРЗ. Вагові функції  $l, \lambda, \mu, p$  не беруть участі в розбитті початкового графа  $G$ . Таким чином, для вирішення завдання розбиття трубопровідної транспортної мережі на АРЗ достатнє задання вагового графа мережі в усіченій формі

$$G[z] = (V, E; z).$$

Розбиття початкового графа на підграфи АРЗ можна проводити вручну або за допомогою сучасних комп'ютерних технологій. У будь-якому випадку процедура розбиття відповідає алгоритму, зображеному на рис. 2.2.

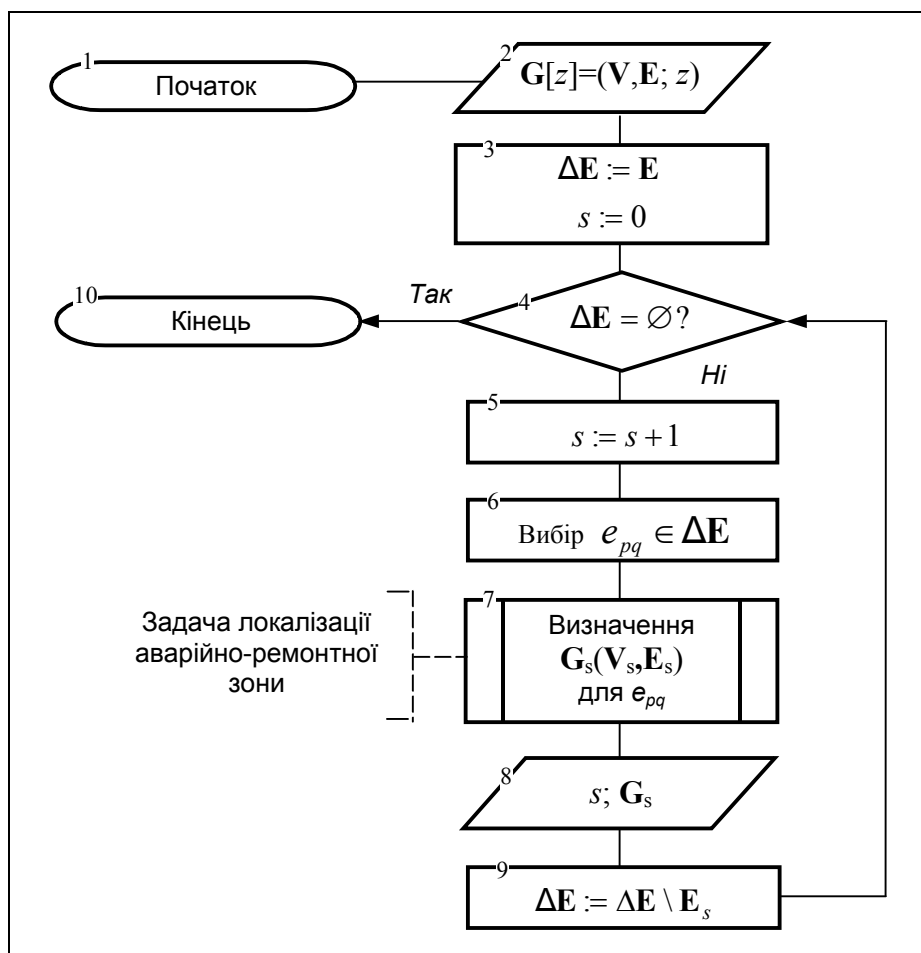


Рис. 2.2 – Схема алгоритму розбиття графа мережі на підграфи АРЗ

Алгоритм розбиття починають з введення даних, що визначають математичну модель початкового графа трубопровідної транспортної мережі (блок 2). Ці дані є двовимірним масивом  $E$  розмірності  $m \times 3$ . Елементи масиву відповідають вмісту двох стовпців табл. 2.1, виділених сірим фоном, і задають всі ребра графа й відповідні значення вагової функції  $z$ . Тут  $m$  – загальна кількість ребер в початковому графі мережі. Кожному ребру  $e_{ij}$  графа відводиться три елемента масиву  $E$  для позначення: початкової вершини  $v_i$ , кінцевої вершини  $v_j$  та значення вагової функції  $z(e_{ij})$ .

Наступний блок 3 створює допоміжний масив, заповнюючи його множиною всіх ребер початкового графа та готує (очищає) програмний лічильник зон.

Блоки 4 – 10 організовують циклічну обробку початкових даних і виведення результатів обробки. При кожному виконанні циклу формується підграф нової АРЗ, номер якої  $s$  визначається вмістом лічильника (блок 5). У блоці 6 з непорожнього масиву  $\Delta E$  вибирається довільне ребро  $e_{pq}$ . Наступний блок 7 (процедура) з початкового графа  $G$  виділяє  $s$ -й підграф, якому належить ребро  $e_{pq}$ . Блок 8 фіксує результати циклічної обробки: номер  $s$  чергової АРЗ і відповідний цій зоні підграф  $G_s$ . Кінцевий блок циклу 9 з допоміжного масиву  $\Delta E$  видаляє всі ребра, що належать підграфові  $G_s$ . Циклічна обробка завершується, коли після формування підграфа чергової АРЗ масив  $\Delta E$  виявиться порожнім (блок 4).

Вихід з циклу за критерієм блоку 4 приводить до завершення роботи алгоритму. Номер останньої зони, що визначається програмною змінною  $s$ , указує на загальну кількість АРЗ у трубопровідній мережі.

Трубопровідна транспортна мережа, окрім суттєвої запірної арматури, може мати *несуттєву* запірну арматуру, поточне положення якої «закрите» або «відкрите» не впливає на доступ ЦП в АРЗ. Прикладом такої арматури може бути засувка  $a_c^-$  на рис. 2.1.

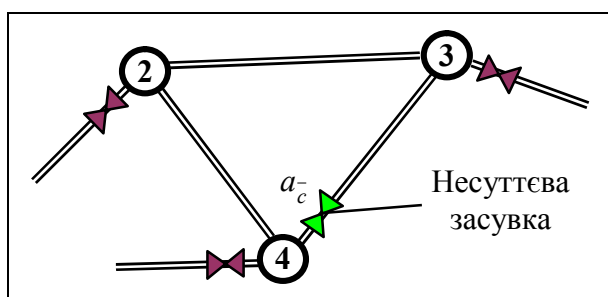


Рис. 2.3 – Фрагмент мережі з несуттєвою засувкою

Положення несуттєвої запірної арматури впливає тільки на гідравлічний опір трубопровідної ділянки, в якій вона встановлена.

У вирішенні задачі «розбиття трубопровідної транспортної мережі на АРЗ» кінцевий результат залежить тільки від суттєвої запірної арматури. Для уникнення від помилок, пов'язаних з розбиттям запірної арматури на суттєву та несуттєву, необхідно, щоб вагова функція  $z$  враховувала всю присутню в мережі запірну арматуру. Тоді коректне програмне розбиття арматури на суттєву та несуттєву здійснюється автоматично в процесі циклічного виконання процедури визначення підграфа АРЗ

$G_s[z] = (V_s, E_s; z)$  для довільно узятото ребра  $e_{pq}$  з множини ребер  $E$  (процедурний блок 7).

Визначення підграфа АРЗ  $G_s$  для довільного ребра  $e_{pq}$  є ключовою процедурою в вирішенні задачі розбиття початкового графа мережі на АРЗ. Вона заслуговує докладнішого розгляду.

Кожне ребро  $e_{ij}$  початкового графа  $G$  входить в декілька підграфів, які можуть бути відсічені від початкового графа за допомогою різних комбінацій суттєвих засувов. Тут  $m_{ij}$  – загальне число таких підграфів для ребра  $e_{ij}$ . Найбільший підграф, що відсікається, – це початковий граф всієї трубопровідної транспортної мережі. Принаймні, один з  $m_{ij}$  підграфів, хай таким підграфом буде підграф  $G_r^{ij}[z]$  ( $G_r^{ij}[z] \subset G[z]$ ), має найменше число ребер:

$$card E_1 = \min_r \{card E_r\}, \quad r = \overline{1, m_{ij}}. \quad (2.7)$$

Саме підграф  $G_1[z]$  є моделлю шуканої зони, якою належить трубопровід, відповідний ребру  $e_{ij}$ . Загальна кількість різних мінімальних підграфів типу  $G_1[z]$  така ж, як і кількість всіх АРЗ в мережі. Для кожного мінімального підграфа характерною рисою є відсутність суттєвої запірної арматури усередині АРЗ. Тільки несуттєва запірна арматура може знаходитися усередині АРЗ, і тільки усередині.

Задача локалізації АРЗ для конкретного трубопроводу формулюється таким чином.

*Дано:* математична модель трубопровідної транспортної мережі у вигляді зв'язного зваженого графа  $G[z] = (V, E; z)$  і вказано ребро  $e_{pq}$ , відповідне трубопровідній ділянці, для якої визначається аварійно-ремонтна зона.

*Потрібно* зі всіх підграфів  $G_g^{pq}[z]$ ,  $g = \overline{1, m_{pq}}$ , що містять ребро  $e_{pq}$ , входять в початковий граф  $G[z]$  і межують з рештою частини графа  $G[z] \setminus G_g^{pq}[z]$  тільки за допомогою суттєвої запірної арматури, знайти підграф  $G_1[z] = (V_1, E_1; z_1)$  такий, що задовольняє критерію  $card E_1 = \min_r \{card E_g\}$ ,  $g = \overline{1, m_{pq}}$ , де  $m_{pq}$  – загальне число існуючих підграфів  $G_g^{pq}[z]$ .

Теоретично рішення даної задачі може бути отримане шляхом прямого перебору всіх можливих комбінацій ребер, що створюють зв'язні підграфи і включають ребро, з паралельною перевіркою для кожної

комбінації виконання вимог задачі. Проте практично такий спосіб неефективний із-за астрономічного числа можливих комбінацій.

Вирішення задачі локалізації АРЗ для довільно взятого ребра  $e_{pq}$  з множені  $\mathbf{E}$  без прямого перебору можна отримати за допомогою рекурсивного алгоритму, запропонованого Самойленко М.І. в [55], якщо початковий граф мережі перетворити в орієнтований граф. При цьому кожне ребро  $e_{ij}$  в початковому графові замінюється дугою, направленою від вершини  $v_i$  до вершини  $v_j$ . Даний алгоритм оперує тільки ребрами графа мережі, які безпосередньо сполучаються з вказаним ребром  $e_{pq}$ , рекурсивно нарощуючи його до підграфа  $\mathbf{G}_1[z] = (\mathbf{V}_1, \mathbf{E}_1; z_1)$ , тобто підграфа, який гарантовано задовольняє критерію (2.7). Це дозволяє вилучити з вирішення задачі переважне число ребер, а само рішення зробити компактним, наочним і простим, особливо при відстежуванні процесу вирішення за допомогою комп'ютерної графіки, наприклад, в графічному середовищі AUTOCAD.

Рекурсивний алгоритм локалізації АРЗ відповідає обчислюваній функції

$$f(e_{pq}) = \begin{cases} \mathbf{G}_0, & \text{якщо } z_{pq} = 3; \\ R(\mathbf{G}_0, v_p), & \text{якщо } z_{pq} = 2; \\ R(\mathbf{G}_0, v_q), & \text{якщо } z_{pq} = 1; \\ R(R(\mathbf{G}_0, v_p), v_q), & \text{якщо } z_{pq} = 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

де

$$\forall e_{pq} \in \mathbf{E}, \quad \mathbf{E}_0 = \{e_{pq}\}, \quad \mathbf{V}_0 = \{v_p, v_q\}, \quad \mathbf{G}_0 = (\mathbf{V}_0, \mathbf{E}_0); \quad (2.9)$$

$$R(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{якщо } v_r \in \mathbf{V}_1 \vee \text{card } \mathbf{E}_r^c = 0; \\ R(Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \quad i \neq j, \\ & \text{якщо } \text{card } \mathbf{E}_r^c > 1; \\ Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \quad i \neq j, \\ & \text{якщо } \text{card } \mathbf{E}_r^c = 1, \end{cases} \quad (2.10)$$

$$Q(G_1, v_r) = \begin{cases} G_1, & \text{якщо } z_{ij} = 3 \vee z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in E_r^- \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in E_r^+; \\ G_1 \cup G_{ij}, & \text{якщо } z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in E_r^+ \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in E_r^-; \\ G_1 \cup G_{ij} \cup R(G_1, v_s \mid v_s \in \{v_i, v_j\}, v_s \neq v_r), & \\ & \text{якщо } z_{ij} = 0. \end{cases} \quad (2.11)$$

Тут  $G_1 \cup G_{ij} \Leftrightarrow (V_1 \cup \{v_r\}, E_1 \cup e_{ij})$  за умови  $i = r \vee j = r$ ;  $E_r^-$  – множина дуг, що виходять з вершини  $v_r$ ,  $E_r^- \subseteq \{e_{ir} \mid e_{ir} \in E\}$ ,  $r = \overline{1, n}$ ;  $E_r^+$  – множина дуг, що входять у вершину  $v_r$ ,  $E_r^+ \subseteq \{e_{rj} \mid e_{rj} \in E\}$ ,  $r = \overline{1, n}$ .

У рамках прийнятих в (2.11) позначень об'єднання множин  $E_r^- \cup E_r^+$  утворює множину дуг  $E_r$ , що є інцидентними  $r$ -й вершині, а об'єднання  $\bigcup_{\kappa=1}^n E_\kappa$  визначає множину всіх дуг графа мережі.

У складній трубопровідній мережі при високій зв'язності початкового графа рекурсивна обробка може повернутися у вершину, яка вже була оброблена. При цьому повторна циклічна обробка в (2.10) втрачає сенс, хоч і не впливає на кінцевий результат. Щоб її анулювати, і тим самим зменшити глибину рекурсії, необхідно модифікувати умову (2.10) таким чином:

$$R(G_1, v_r) = \begin{cases} G_1, & \text{якщо } v_r \in V_1 \vee \text{card } E_r^c = 0; \\ R(Q(G_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in E_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{якщо } v_r \notin V_1 \wedge \text{card } E_r^c > 1; \\ Q(G_1, e_{ij}), & e_{ij} \in E_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{якщо } v_r \notin V_1 \wedge \text{card } E_r^c = 1. \end{cases} \quad (2.12)$$

Модифікація (2.12) дозволяє суттєво скоротити час роботи програми, що реалізовує алгоритм розбиття, і зменшити потребу в динамічній пам'яті комп'ютера при її виконанні.

Вирази (2.8) – (2.12) є математичною моделлю процесу розбиття графа мережі на підграфи АРЗ.

Вирішення задачі локалізації АРЗ в графічному середовищі *AUTOCAD* дозволяє візуально спостерігати процес розбиття початкового графа мережі на підграфи АРЗ.

Стосовно даного прикладу алгоритм розбиття початкового графа мережі на підграфи АРЗ приводить до результатів, наведених на рис. 2.4 та відображених у табл. 2.2.

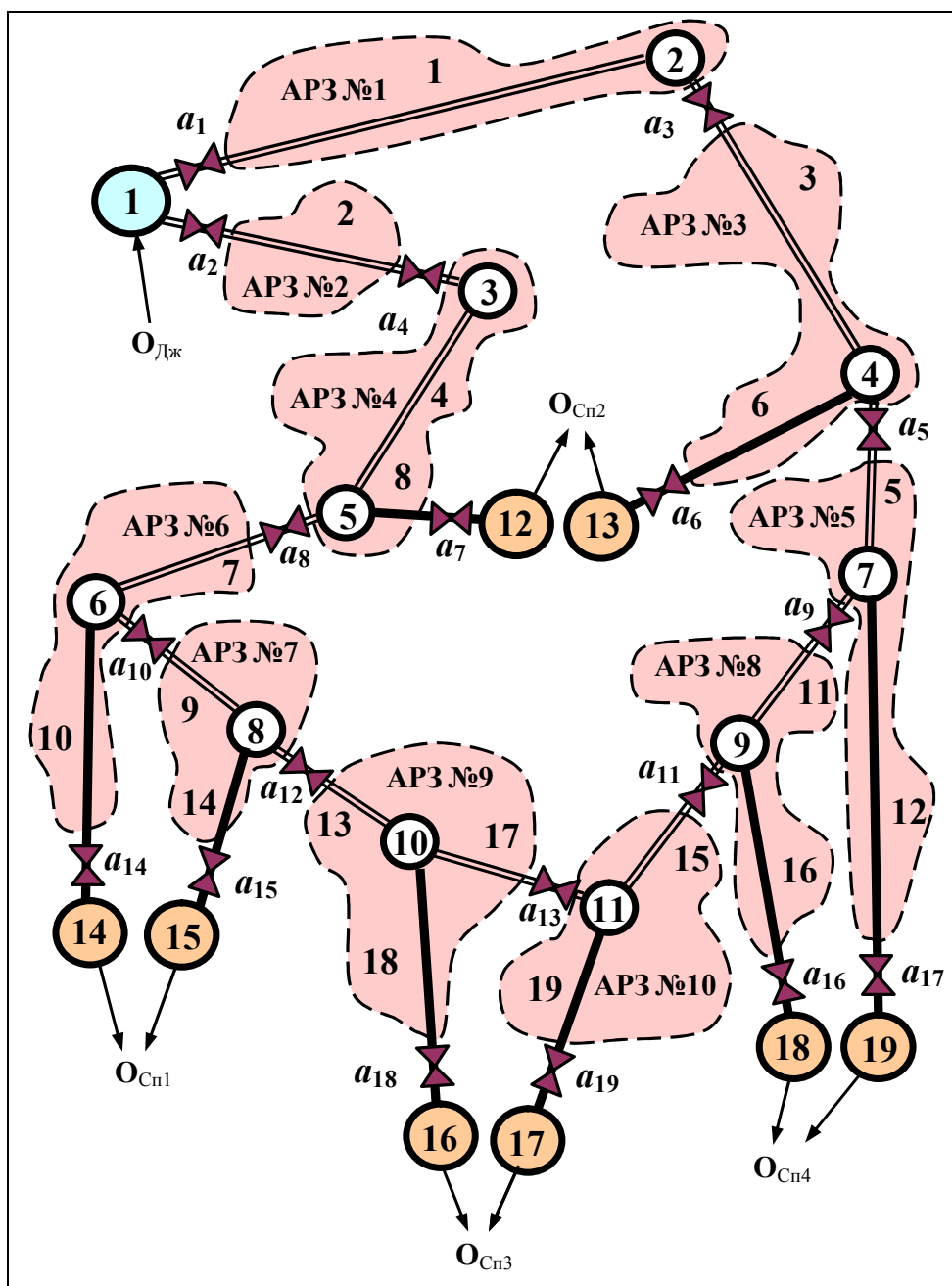


Рис. 2.4 – Розбиття початкового графа трубопровідної мережі на підграфи аварійно-ремонтних зон



В схемі на рис. 2.4 з метою спрощення замість позначень трубопровідних ділянок  $t_i$  ( $i = \overline{1,19}$ ), що мали місце в схемі на рис. 2.1, використовується тільки індекс  $i$  (номер) відповідної трубопровідної ділянки.

Таблиця 2.2 – Результати розбиття графа мережі на підграфи АРЗ

№ АРЗ	Елементи підграфа (складові АРЗ)		
	Ребра підграфа (трубопровідні ділянки)	Суттєві засувки	Вершини підграфа (колодязі)
1	$e_{1,2}$ ( $t_1$ )	$a_1, a_3$	2
2	$e_{1,3}$ ( $t_2$ )	$a_2, a_4$	—
3	$e_{2,4}, e_{4,6}$ ( $t_3, t_6$ )	$a_3, a_5, a_6$	4
4	$e_{3,5}, e_{5,12}$ ( $t_4, t_8$ )	$a_4, a_7, a_8$	5
5	$e_{4,7}, e_{7,12}$ ( $t_5, t_{12}$ )	$a_5, a_9, a_{17}$	7
6	$e_{5,6}, e_{6,10}$ ( $t_7, t_{10}$ )	$a_8, a_{10}, a_{14}$	6
7	$e_{6,8}, e_{8,14}$ ( $t_9, t_{14}$ )	$a_{10}, a_{12}, a_{15}$	8
8	$e_{7,9}, e_{9,18}$ ( $t_{11}, t_{16}$ )	$a_9, a_{11}, a_{16}$	9
9	$e_{8,10}, e_{10,11}, e_{10,16}$ ( $t_{13}, t_{17}, t_{18}$ )	$a_{12}, a_{13}, a_{18}$	10
10	$e_{9,11}, e_{11,17}$ ( $t_{15}, t_{19}$ )	$a_{11}, a_{13}, a_{19}$	11

Результати розбиття вказують на такі особливості трубопровідної транспортної мережі:

- мережа складається з десяти аварійно-ремонтних зон;
- всі засувки є суттєвими;
- дві АРЗ стикуються з джерелом ЦП;
- всі споживачі живляться через різні АРЗ;
- кожний споживач має принаймні два різних маршрути постачання ЦП;
- кожний споживач має два різних маршрути постачання ЦП, що не перетинаються проміж собою (не мають спільних колодязів).

Проведення двох перших етапів методу АРЗ, які закінчуються розбиттям початкового графа мережі на підграфи АРЗ, дозволяють встановити ступінь ремонтпристосованості трубопровідної мережі. Так

аналіз схеми на рис. 2.4 показує, що в умовах прикладу кожний споживач живиться від двох різних АРЗ та має два різних маршрути постачання ЦП, що не перетинаються між собою. Це свідчить про максимальну (стовідсоткову) ремонтпристосованість мережі, тобто проведення аварійно-ремонтних або профілактичних робіт в будь-якій зоні не приводить до переривання постачань ЦП в системі хоча би одному споживачеві.

### 2.3. Розрахунок технічної надійності аварійно-ремонтної зони

Технічний стан аварійно-ремонтної зони не залежить від технічного стану конструктивних елементів інших зон. Вихід з ладу *будь-якого* елементу однієї зони не спричиняє за собою виходу з ладу будь-якої іншої зони або будь-якого конструктивного елементу, що належить іншій зоні. Тому кожна АРЗ може розглядатися як незалежний макроелемент в трубопровідній структурі транспортної мережі, що складається з мікроелементів (запірної арматури, трубопроводів, колодязів і ін.) і успадковує властивості своїх мікроелементів. Якщо який-небудь мікроелемент переходить у стан «несправний», то і відповідний макроелемент також переходить у стан «несправний». Технічний стан АРЗ залежить тільки від технічного стану конструктивних елементів, що входять до складу цієї АРЗ і тільки цієї. При цьому технічний стан АРЗ жодним чином не залежить від того, як мікроелементи об'єднуються в макроелемент, тобто не залежать від топологічної структури АРЗ. Надалі, структуру АРЗ називатимемо мікроструктурою.

Функціонування ж всієї трубопровідної мережі залежить не тільки від технічного стану кожної АРЗ, але і від топологічної структури, що об'єднує всі АРЗ в єдину трубопровідну транспортну мережу. Надалі, топологічну структуру мережі на рівні АРЗ називатимемо макроструктурою. Вирішення функціональної задачі, що пов'язана з безперервним постачанням ЦП, відносно кожного конкретного споживача і відносно всіх споживачів разом залежатиме від технічного стану кожної АРЗ і від того, як АРЗ стикаються між собою, тобто від макроструктури мережі.

Зі сказаного можна зробити такі висновки:

- технічна надійність АРЗ залежить від технічної надійності конструктивних елементів, що входять до її складу, і не залежить від внутрішньої структури АРЗ (мікроструктури);
- функціональна надійність мережі залежить від макроструктури мережі, складу АРЗ (макроелементів) і технічної надійності кожної АРЗ;

– функціональна надійність всій мережі не залежить від внутрішньої мікроструктури АРЗ.

Таким чином, для розрахунку показників функціональної надійності НТТС необхідно заздалегідь розрахувати технічну надійність всіх АРЗ трубопровідної мережі.

Як було відмічено раніше, АРЗ вважається працездатною, якщо працездатні всі її елементи. Це означає, що технічній надійності АРЗ відповідає послідовна модель надійності технічних систем (рис. 2.5).

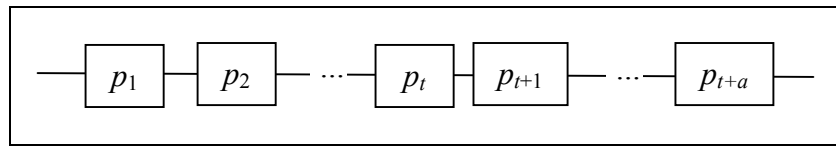


Рис. 2.5 – Послідовна модель технічної надійності АРЗ

На рис. 2.5 послідовна модель технічної надійності АРЗ складається з надійності всіх трубопроводів  $p_1, p_2, \dots, p_t$  і несуттєвих засувок  $p_{t+1}, p_{t+2}, \dots, p_{t+a}$ . Тут  $t$  – загальна кількість трубопроводів в АРЗ,  $a$  – кількість несуттєвих засувок в зоні. Технічна надійність всієї зони  $P_Z$  в цьому випадку визначається за формулою

$$P_Z = \left( \prod_{i=1}^t p_i \right) \cdot \left( \prod_{i=t+1}^{t+a} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t+a} p_i. \quad (2.13)$$

Структура АРЗ може мати саму різну конфігурацію, але як би трубопроводи й несуттєві засувки не об'єднувалися в єдину АРЗ, модель надійності (2.13) цієї зони залишатиметься без будь-яких змін.

Використання формули (2.13) припускає наявність імовірності безвідмовної роботи кожного елемента зони. Ця імовірність може бути отримана для засувки на підставі паспортних даних пристрою з урахуванням часу експлуатації. Для трубопровідної ділянки імовірність її безвідмовної роботи визначається за формулою

$$p_i = 1 - \frac{\lambda_i l_i}{\mu_i}, \quad i = \overline{1, t}, \quad (2.14)$$

де  $t$  – кількість трубопровідних ділянок в АРЗ;  $\lambda_i$  – інтенсивність відмов  $i$ -ї трубопровідної ділянки, що визначається як кількість відмов протягом року на 1 км. труби з певними параметрами (товщина стінок, діаметр, матеріал, термін експлуатації),  $\text{км}^{-1} \text{год}^{-1}$ ;  $\mu_i$  – інтенсивність усунення

несправностей, що визначається як величина, зворотна часу усунення однієї несправності на трубопроводі  $i$ -го типу,  $p_i k^{-1}$ ;  $l_i$  – довжина  $i$ -ї трубопровідної ділянки, км.

Дані для визначення ймовірності трубопровідної ділянки (трубопроводу) за формулою (2.14) беруть з табл. 2.1.

Розрахуємо технічну надійність всіх АРЗ трубопровідної транспортної мережі, заданої умовою даного прикладу.

Для проведення розрахунку технічної надійності АРЗ перетворимо спочатку табл. 2.1 в табл. 2.3, скориставшись формулою (2.14).

Таблиця 2.3 – Надійність конструктивних елементів трубопровідної мережі

Індекс трубопровідної ділянки	Індекс АРЗ	Надійність	
		$p_i$	$p^T(e_{ij})$
1	1	0,9640	[ 0,99 1 ]
2	2	0,9660	[ 0,99 0,99]
3	3	0,9873	[ 0,99 1 ]
4	4	0,9854	[ 1 1 ]
5	5	0,9927	[ 0,98 1 ]
6	3	0,9947	[ 1 0,97]
7	6	0,9964	[ 0,98 1 ]
8	4	0,9995	[ 1 0,97]
9	7	0,9982	[ 0,98 1 ]
10	6	0,9992	[ 1 0,97]
11	8	0,9987	[ 0,98 1 ]
12	5	0,9995	[ 1 0,97]
13	9	0,9964	[ 0,98 1 ]
14	7	0,9994	[ 1 0,97]
15	10	0,9996	[ 0,98 1 ]
16	8	0,9994	[ 1 0,97]
17	9	0,9982	[ 1 0,98]
18	9	0,9989	[ 1 0,97]
19	10	0,9997	[ 1 0,97]

Таблиця у форматі табл. 2.1 зручна для подання початкових даних при проектуванні трубопровідної мережі, коли відсутня можливість статистичної оцінки надійності роботи різних її елементів. Таблиця ж у форматі табл. 2.4 зручна для подання початкових даних в випадку діючої мережі, коли надійність кожного її елементу визначається на підставі накопичених даних про стан цього елементу в процесі експлуатації.

Технічні надійності аварійно-ремонтних згідно з формулою (2.13) при збереженні для  $p_i$  індексації, що використовувалась в табл. 2.4, визначається таким чином:

- для АРЗ №1  $P_{z1} = p_1 = 0,964$ ;
- для АРЗ №2  $P_{z2} = p_2 = 0,966$ ;
- для АРЗ №3  $P_{z3} = p_3 p_6 = 0,9821$ ;
- для АРЗ №4  $P_{z4} = p_4 p_8 = 0,9849$ ;
- для АРЗ №5  $P_{z5} = p_5 p_{12} = 0,9922$ ;
- для АРЗ №6  $P_{z6} = p_7 p_{10} = 0,9956$ ;
- для АРЗ №7  $P_{z7} = p_9 p_{14} = 0,9976$ ;
- для АРЗ №8  $P_{z8} = p_{11} p_{16} = 0,9981$ ;
- для АРЗ №9  $P_{z9} = p_{13} p_{17} p_{18} = 0,9935$ ;
- для АРЗ №10  $P_{z10} = p_{15} p_{19} = 0,9993$ .

#### 2.4. Перетворення початкового графа мережі в граф аварійно-ремонтних зон

Четвертий етап методу АРЗ припускає перетворення початкового зваженого графа  $G[z, l, \lambda, \mu, p]$  транспортної мережі в новий зважений граф АРЗ

$$Z[p, p_a] = (V_z, E_z; p, p_a). \quad (2.15)$$

Тут  $V_z$  – множина вершин макрографа, відповідних аварійно-ремонтним зонам мережі;  $E_z$  – множина ребер макрографа, що визначають топологічні зв'язки між АРЗ;  $p$  – вагова функція на вершинах графа, що визначає технічну надійність відповідної АРЗ;  $p_a$  – вагова функція на ребрах графа, що визначає технічну надійність засувки, відповідних цим ребрам.

Потужність множини  $V_z$  визначається загальною кількістю АРЗ в мережі. Потужність множини  $E_z$  визначається загальною кількістю

суттєвих засувок. Несуттєві засувки жодним чином не впливають на структуру макрографа АРЗ.

Четвертий етап дозволяє усунути з початкового графа мережі всю графічну інформацію, що не має відношення до розрахунку функціональної надійності, а п'ять вагових функцій замінити двома.

Два попередні етапи готують початкові дані для процедури побудови зваженого макрографа АРЗ. Так, 2-й етап (розбиття початкового графа на підграфи АРЗ) визначає склад і структуру макрографа, а 3-й етап (розрахунок технічної надійності АРЗ) визначає вагову функцію  $p$ , що присутня в математичній моделі макрографа (2.15). Друга вагова функція  $p_a$  макрографа АРЗ витягується з вагової функції  $p$  початкового графа.

Вершини початкового графа, які відповідають джерелу ЦП та споживачам, зберігають своє призначення і топологічне положення в макрографі АРЗ.

В умовах прикладу макрограф АРЗ має вигляд, зображений на рис. 2.6.

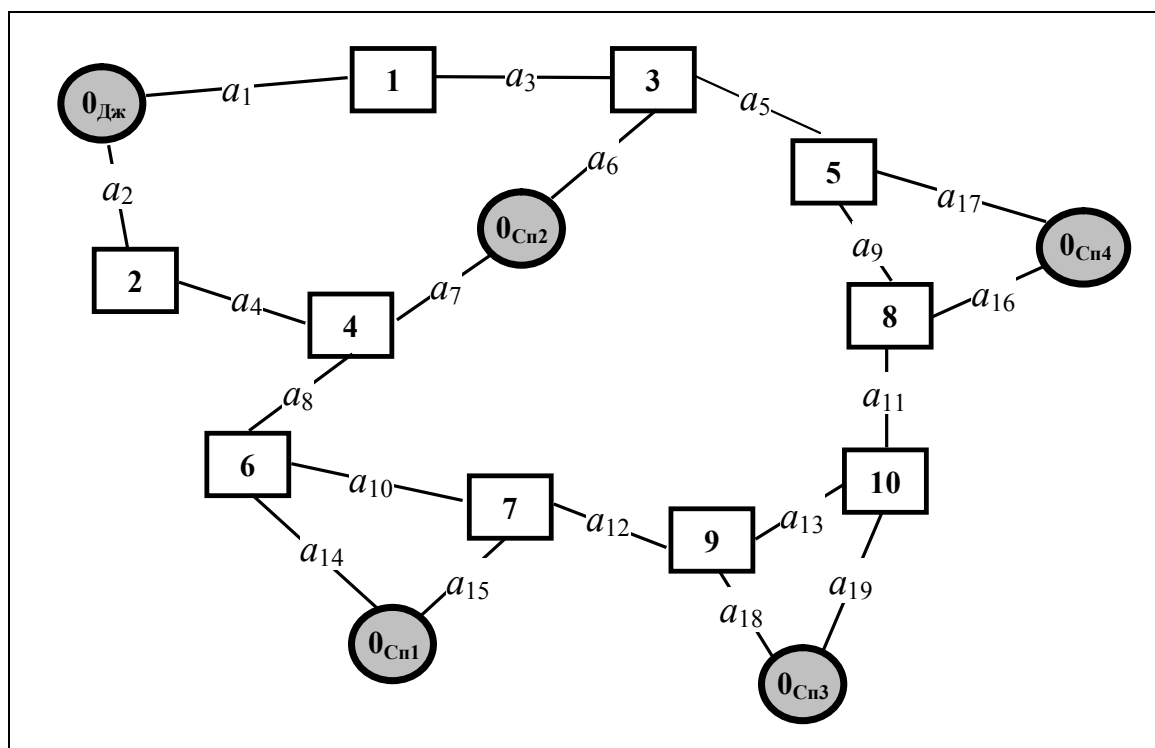


Рис. 2.6 – Макрограф аварійно-ремонтних зон

Вагові функції  $p$  та  $p_a$  макрографа  $Z[p, p_a]$  надаються за допомогою відповідно табл. 2.4 і 2.5.

Таблиця 2.4 – Вагова функція  $p$  на вершинах графа АРЗ

Індекс АРЗ $k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значення вагової функції $p_k$	0,9640	0,9660	0,9820	0,9850	0,9922	0,9955	0,9976	0,9981	0,9935	0,9994

Таблиця 2.5 – Вагова функція  $p_a$  на ребрах графа АРЗ

Позначення засувки $a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{16}$	$a_{17}$	$a_{18}$	$a_{19}$
Значення вагової функції $p_{a_i}$	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Макрограф АРЗ є наочним засобом для вираження загальної структури НТТС. Він показує, яким чином і за допомогою якої запірної арматури аварійно-ремонтні зони стикаються між собою, з джерелом ЦП та споживачами. Але найголовніше – він містить в повному об'ємі всю корисну інформацію, необхідну для розрахунку функціональної надійності системи відносно будь-якого споживача мережі.

Макрографа АРЗ успадковує всі структурні особливості початкового графа трубопровідної мережі, що грають суттєву роль у виконанні чергового етапу розрахунку функціональної надійності, а саме:

- тільки дві АРЗ №1 та АРЗ №2 стикаються безпосередньо з джерелом ЦП;
- всі споживачі живляться через різні АРЗ;
- кожний споживач має принаймні два різних маршрути постачання ЦП;
- кожний споживач має два різних маршрути постачання ЦП, що *не перетинаються* між собою (не мають спільних колодязів).

## 2.5. Побудова спрощеного макрографа мережі стосовно конкретного споживача

Як правило, постачання ЦП конкретному споживачеві трубопровідної транспортної мережі залежить не від всіх АРЗ. Так, постачання ЦП споживачам зон, що безпосередньо стикують з джерелом ЦП, залежать тільки від надійності цих зон і не залежать від решти.

У загальному випадку, якщо не один маршрут транспортування ЦП від джерела до конкретного споживача не проходить через яку-небудь зону мережі, то працездатність цієї зони не впливає на функціональну надійність мережі щодо даного споживача. Ця обставина дозволяє спростити граф АРЗ (макрографа мережі) для розрахунку функціональної надійності мережі відносно того або іншого споживача. Спрощення графа АРЗ відповідно спрощує його аналіз на предмет побудови розрахункової моделі функціональної надійності мережі відносно конкретного споживача.

В умовах прикладу спрощення макрографа мережі має місце тільки стосовно споживача  $O_{н2}$  (рис. 2.7).

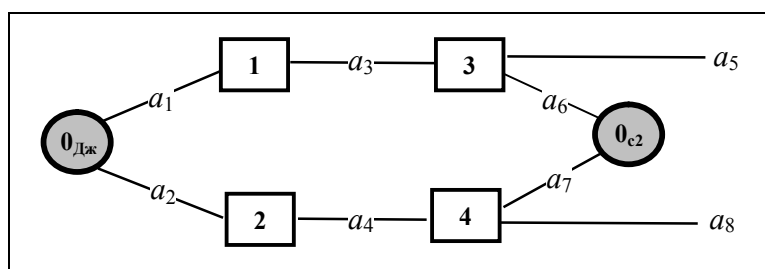


Рис. 2.7 – Спрощений макрограф мережі стосовно споживача  $O_{н2}$

Цільовий продукт від джерела  $O_{Дж}$  може транспортуватися до споживача  $O_{н2}$  двома маршрутами: через зони №1 та №3 або через зони №2 та №4. Непрацездатність зони №1 або №3 робить транспортування ЦП одним з двох маршрутів неможливим. У свою чергу, вихід з ладу будь-якої з засувок  $a_1, a_3, a_5, a_6$  приводить до непрацездатності однієї чи обох зон №1 і №3. Аналогічна ситуація має місце стосовно іншого маршруту постачання ЦП до споживача  $O_{н2}$ . Так, транспортування ЦП цим маршрутом стає неможливим, якщо вийде з ладу зона №2 або зона №4. У свою чергу, вихід з ладу будь-якої з засувок  $a_2, a_4, a_7, a_8$  приводить до непрацездатності зони №2 чи №4 або обох зон разом. Працездатність решти зон (№5, №6, ..., №10) і засувок ( $a_9, a_{10}, \dots, a_{19}$ ) на транспортування ЦП до споживача  $O_{н2}$  не впливають, оскільки можуть



бути відсічені від маршрутів транспортування ЦП працюючими засувками  $a_5$  та  $a_8$ . Тому всі конструктивні елементи мережі, відповідні елементам графа на рис. 2.7, впливають на функціональну надійність мережі щодо споживача  $O_{Cп2}$ .

Стосовно інших споживачів спрощення графа АРЗ не відбувається – стан будь-якого конструктивного елемента трубопровідної мережі впливає на функціональну надійність. Багато в чому це пов'язано з кільцюванням мережі. На рис. 2.8 – 2.10 наведені відповідні графи АРЗ. Характерною рисою кожного графа є те, що транспортування ЦП до споживача може здійснюватися принаймні двома маршрутами.

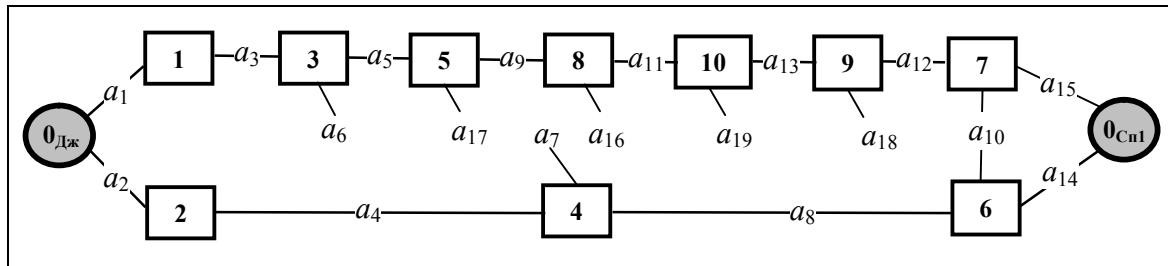


Рис. 2.8 – Макрограф АРЗ стосовно споживача  $O_{Cп1}$

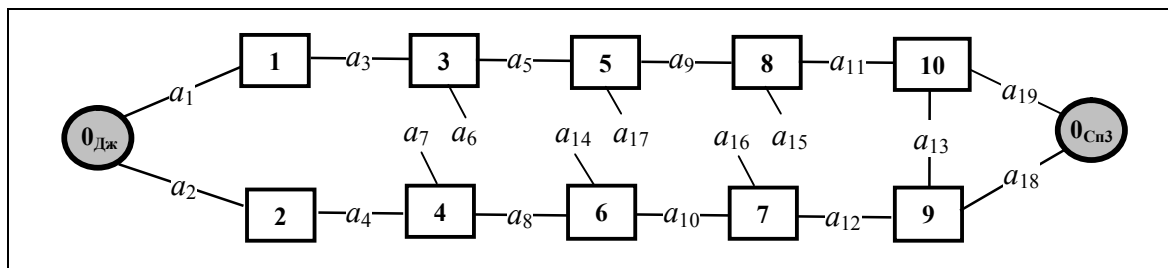


Рис. 2.9 – Макрограф АРЗ стосовно споживача  $O_{Cп3}$

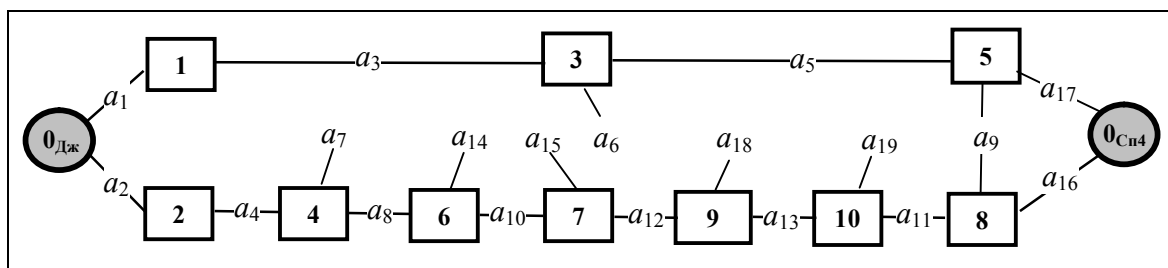


Рис. 2.10 – Макрограф АРЗ стосовно споживача  $O_{Cп4}$

Всі графи АРЗ на рис. 2.7 – 2.10 містять тільки корисну інформацію для розрахунку функціональної надійності мережі щодо конкретних споживачів. Це значно полегшує проведення подальших двох етапів.

## 2.6. Побудова розрахункової моделі функціональної надійності трубопровідної транспортної мережі стосовно конкретного споживача

Розрахункова модель функціональної надійності трубопровідної транспортної мережі для кожного конкретного споживача будується на основі спрощеного макрографа АРЗ щодо даного споживача, тобто в умовах приклада – на основі схем, зображених на рис. 2.7 – 2.10.

Розрахункова модель успадковує структуру спрощеного графа. При цьому вершини, що відповідають зонам, і ребра, що відповідають, засувкам, замінюються блоками з позначкою на них технічної надійності відповідних елементів трубопровідної транспортної мережі.

На рис. 2.11 наведені розрахункова модель функціональної надійності стосовно споживача  $O_{\text{сп2}}$  трубопровідної транспортної мережі в умовах прикладу.

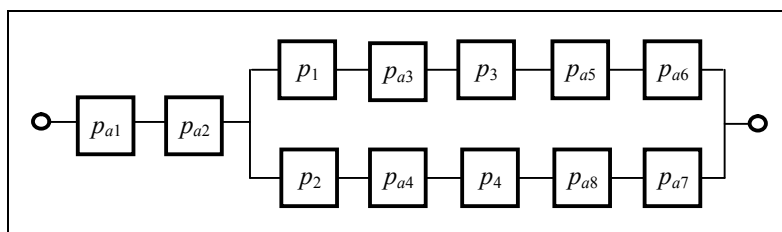


Рис. 2.11 – Розрахункові моделі функціональної надійності мережі відносно споживача  $O_{\text{сп2}}$

Пояснимо побудову розрахункової моделі. Споживачеві  $O_{\text{сп2}}$  поставка ЦП здійснюється за двома маршрутами. Перший маршрут утворюється із засувки  $a_1$  і ланцюжка елементів АРЗ №1 +  $a_3$  + АРЗ №3 +  $a_5$  +  $a_6$ , другий – із засувки  $a_2$  та ланцюжка елементів АРЗ №1 +  $a_3$  + АРЗ №3 +  $a_5$  +  $a_6$ . Вихід з ладу хоча б одного елемента ланцюжка призводить до несправності всього ланцюжка. Тому, кожний ланцюжок має послідовну модель надійності, складовими якої є технічна надійність кожного окремого елемента ланцюжка. Споживач отримуватиме ЦП, якщо в справному стані буде знаходитися хоча б один з ланцюжків. Тільки одночасний вихід з ладу обох ланцюжків приводить до вимушеного припинення подачі ЦП споживачеві. Але цього замало. Крім справності хоча б одного з двох паралельних ланцюжків, необхідно ще одночасно мати працездатними засувки  $a_1$  і  $a_2$ . Тому на рис. 2.9 паралельна модель надійності ланцюжків послідовно з'єднується з надійністю засувки  $a_1$  і  $a_2$ .

Для споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп1}}$  модель функціональної надійності відповідає схемі на рис. 2.12.

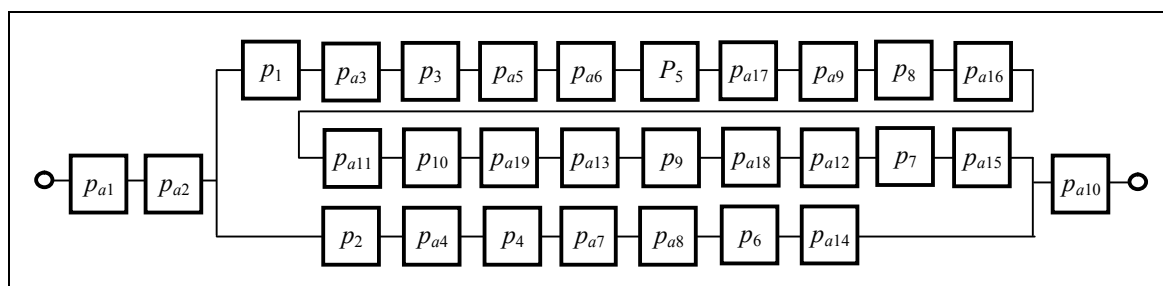


Рис. 2.12 – Розрахункові моделі функціональної надійності мережі відносно споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп1}}$

Розрахункова модель функціональної надійності мережі відносно споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп1}}$  дуже схожа на попередню модель (рис. 2. 11), але суттєвою різницею є наявність в моделі технічної надійності засувки  $a_{10}$ . Вихід з ладу цієї засувки спричиняє вихід з ладу одночасно двох зон: АРЗ №7 і АРЗ №6. Обидва маршрути поставки ЦП стають нездійсненими. Саме тому технічна надійність засувки  $a_{10}$  створює послідовну модель надійності з рештою елементів мережі (рис. 2.12).

Аналогічні розрахункові моделі функціональної надійності мають місце й відносно споживачів  $\mathbf{O}_{\text{Сп3}}$  і  $\mathbf{O}_{\text{Сп4}}$  (рис. 2.13 і 2.14).

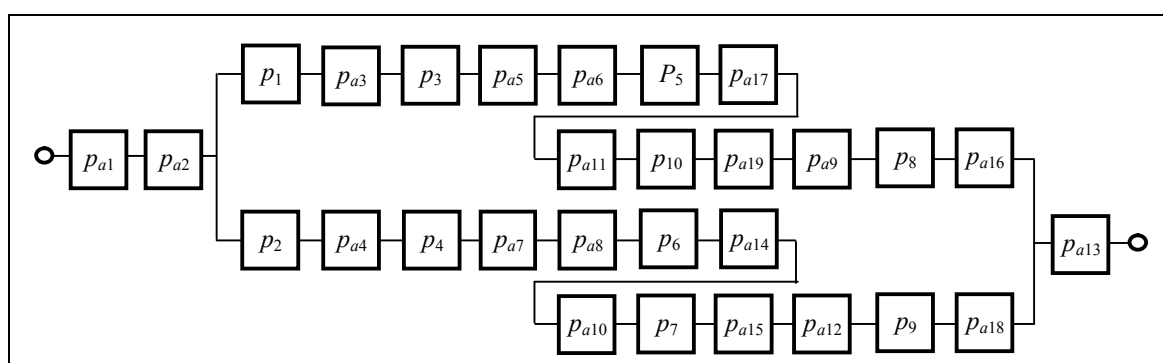


Рис. 2.13 – Розрахункові моделі функціональної надійності мережі відносно споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп3}}$

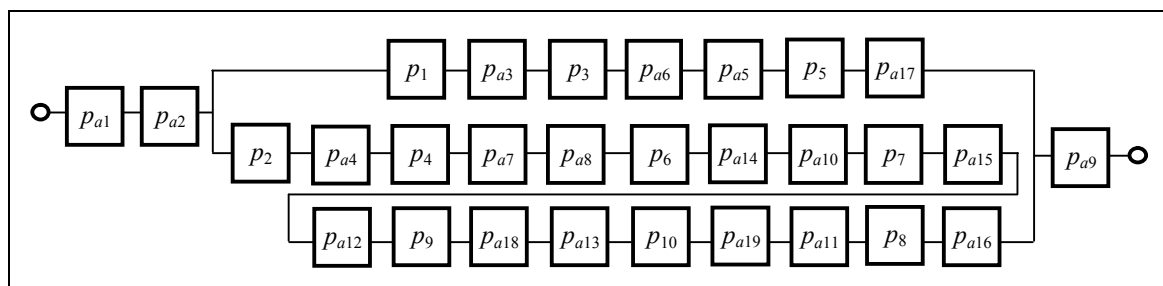


Рис. 2.14 – Розрахункові моделі функціональної надійності мережі відносно споживача  $\mathbf{O}_{\text{сп4}}$

## 2.7. Математична модель функціональної надійності мережі стосовно конкретного споживача

Отримання математичної моделі функціональної надійності мережі стосовно конкретного споживача здійснюється на основі розрахункових моделей за допомогою класичних методів теорії надійності технічних систем.

Математична модель формується для кожного споживача  $\mathbf{O}_{\text{сп}k}$  трубопровідної системи  $k \in \{1, K\}$ . Тут  $K$  – загальна кількість споживачів. Якщо декілька споживачів отримують ЦП тільки з однієї зони, то відповідні їм математичні моделі функціональної надійності співпадають.

Для формування математичної моделі функціональної надійності щодо споживача  $\mathbf{O}_k$  використовують наступні початкові дані:

- розрахункова модель функціональної надійності стосовно споживача  $\mathbf{O}_{\text{сп}k}$ ;
- вагова функція  $p$  на вершинах графа АРЗ, що визначає технічну надійність кожної АРЗ мережі;
- вагова функція  $p_a$  на ребрах графа АРЗ, що визначає технічну надійність запірної арматури мережі.

Якщо розрахункова модель функціональної надійності для довільно узятого споживача  $\mathbf{O}_{\text{сп}k}$  складається тільки з послідовно й паралельно сполучених елементів (немає мостових з'єднань), то процес формування математичної моделі, відповідає алгоритму, наведеному на рис. 2.15.

Як впливає з алгоритму, формування математичної моделі функціональної надійності мережі стосовно споживача  $\mathbf{O}_{\text{сп}k}$  є циклічним процесом заміни в розрахунковій моделі ділянок  $U[p]$  з однотипним з'єднанням елементів одним елементом з еквівалентною надійністю.

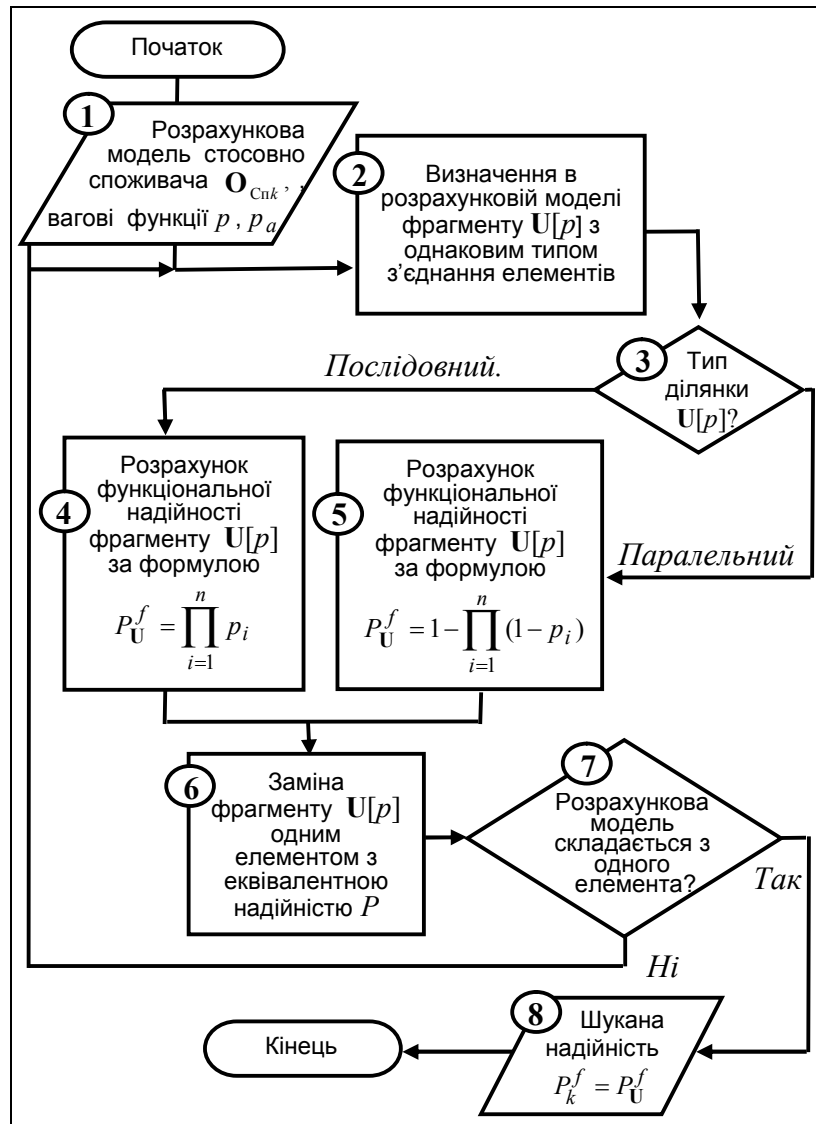


Рис. 2.15 – Схема алгоритму побудови математичної моделі функціональної надійності мережі стосовно конкретного споживача

Еквівалентна надійність розраховується за формулою  $P_U^f = \prod_{i=1}^n p_i$  (у разі послідовного з'єднання елементів) або за формулою  $P_U^f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$  (у разі паралельного з'єднання елементів). Тут  $n$  – кількість елементів в однотипному фрагменті;  $p_i$  – ймовірність безвідмовної роботи елементу трубопровідної мережі, відповідного  $i$ -му елементу фрагменту. Значення  $p_i$  вибирається згідно ваговим функціям  $p$  і  $p_a$  графа АРЗ.

Циклічний процес заміни продовжується до тих пір, поки розрахункова модель не складатиметься тільки з одного елементу. Розрахункова формула надійності  $P_U^f$  цього елементу й буде шуканою

математичною моделлю функціональної надійності мережі стосовно  $k$ -го споживача системи:

$$P_k^f = P_U^f, \quad k = \overline{1, K}. \quad (2.16)$$

Величина  $P_k^f$  показує, з якою ймовірністю трубопровідна мережа забезпечує надходження ЦП від джерела  $k$ -му споживачеві системи протягом певного періоду часу (як правило, один рік).

В умовах даного прикладу початковими даними є:

- розрахункові моделі функціональної надійності, що зображені на рис. 2.11 – 2.14;
- вагова функція  $p$  на вершинах графа АРЗ, що надана за допомогою табл. 2.4;
- вагова функція  $p_a$  на ребрах графа АРЗ, що надана за допомогою табл. 2.6.

Робота алгоритму побудови математичних моделей в умовах прикладу дає наступні результати (генеровані математичні моделі):

- стосовно споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп1}}$

$$\begin{aligned} P_1^f &= p_{a1} p_{a2} \times \\ &\times [1 - (1 - p_1 p_{a3} p_3 p_{a5} p_{a6} p_5 p_{a17} p_{a9} p_8 p_{a16} p_{a11} p_{10} p_{a19} p_{a13} p_9 p_{a18} p_{a12} p_7 p_{a15}) \times \\ &\times (1 - p_2 p_{a4} p_4 p_{a8} p_{a7} p_6 p_{a14})] p_{a10}; \end{aligned} \quad (2.17)$$

- стосовно споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп2}}$

$$P_2^f = p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{a3} p_3 p_{a5} p_{a6}) (1 - p_2 p_{a4} p_4 p_{a8} p_{a7})]; \quad (2.18)$$

- стосовно споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп3}}$

$$\begin{aligned} P_3^f &= p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{a3} p_3 p_{a5} p_{a6} p_5 p_{a17} p_{a11} p_{10} p_{a19} p_{a9} p_8 p_{a16}) \times \\ &\times (1 - p_2 p_{a4} p_4 p_{a7} p_{a8} p_6 p_{a14} p_{a10} p_7 p_{a15} p_{a12} p_9 p_{a18})] p_{a13}; \end{aligned} \quad (2.19)$$

- стосовно споживача  $\mathbf{O}_{\text{Сп4}}$

$$P_4^f = p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{a3} p_3 p_{a6} p_{a5} p_5 p_{a17}) \times \\ \times (1 - p_2 p_{a4} p_4 p_{a7} p_{a8} p_6 p_{a14} p_{a10} p_7 p_{a15} p_{a12} p_9 p_{a18} p_{a13} p_{10} p_{a19} p_{a11} p_8 p_{a16})] p_{a9}. \quad (2.20)$$

Тут  $p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{a19}$  – значення вагової функції  $p_a$ ;  $p_1, p_2, \dots, p_{10}$  – значення вагової функції  $p$ .

Розрахунки функціональної надійності за математичними моделями (2.17) – (2.20) дають наступні шукані значення:  $P_1^f = 0,9351$ ;  $P_2^f = 0,9756$ ;  $P_3^f = 0,9232$ ;  $P_4^f = 0,9316$ .

Отримані математичні моделі можна використовувати не тільки для розрахунку конкретного значення показника ФН, а також для їх аналізу з метою подальшого удосконалення конструкції мережі. Вже тільки по загальному вигляду моделі, можна зробити висновки про доцільність нових змін у структурі мережі. Так, всі моделі (2.17) – (2.20) показують слабе місце в конструкції мережі, пов'язане із засувками  $a_1$  і  $a_2$ . Якщо вихід з ладу будь-якої ділянки не призводить до припинення транспортування ЦП хоча б одному споживачеві, то вихід із ладу засувки  $a_1$  або  $a_2$  призводить до загального припинення транспортування ЦП в мережі.

Далі, згідно з моделлю (2.17), якщо засувка  $a_{10}$  вийде з ладу, то транспортування ЦП до споживача  $O_1$  (і тільки до нього) стає неможливим.

Аналогічно, моделі (2.19) і (2.20) свідчать, про те що вихід з ладу засувки  $a_{13}$  або  $a_9$ , призводить до припинення транспортування ЦП відповідно до споживача  $O_3$  або  $O_4$ .

Таким чином, аналіз тільки виду моделей (2.17) – (2.20) підводить к висновку про необхідність обов'язкового резервування засувки  $a_1$  і  $a_2$ , а також про бажане резервування засувки  $a_9$ ,  $a_{10}$  і  $a_{13}$ . В останньому випадку для виправлення становища достатньо до кожної засувки приєднати послідовно ще одну, таку ж саму.

## 2.8. Порівняльний аналіз трубопроводних мереж за критерієм функціональної надійності

Найбільшу користь метод АРЗ приносить в проектуванні нових НТТС. Метод дозволяє здійснювати порівняльний аналіз альтернативних структур трубопроводної мережі за критерієм функціональної надійності. При цьому він забезпечує проектувальників не тільки якісним порівнянням

типу «краще – гірше», а також можливістю конкретно визначити, на скільки краще або на скільки гірше.

Продемонструємо здатність методу до порівняльного аналізу на прикладі трубопровідної мережі, що розглядалася для ілюстрації етапів методу АРЗ. Порівняємо її за критерієм функціональної надійності з трубопровідною мережею, що подана в [49]. Обидві мережі, як це вже було зауважено, мають однаковий склад споживачів, одне й те ж джерело ЦП та однакове взаємне розташування споживачів и джерела. Мережі різняться тільки своєю структурою. Можна вважати, що це одна й та ж мережа, яка піддалася реконструкції. Причому метою реконструкції є підвищення функціональної надійності мережі за рахунок її кільцювання.

Всі розрахункові дані для порівняльного аналізу здобуті методом АРЗ й зведені в табл. 2.6 і 2.7.

Перша таблиця призначена для порівняльного аналізу за абсолютними показниками. Як показник функціональної надійності (ПФН) розглядається імовірність безперервного постачання ЦП конкретному споживачу.

Таблиця 2.6 – Порівняльна таблиця абсолютної зміни функціональної надійності трубопровідної мережі внаслідок її кільцювання

Індекс споживача	Позначення ПФН	Значення ПФН		Абсолютне покращення ПФН, $\Delta P^f$
		до кільцювання	після кільцювання	
1	$P_1^f$	0,8374	0,9351	0,0997
2	$P_2^f$	0,8876	0,9756	0,0880
3	$P_3^f$	0,7532	0,9232	0,1700
4	$P_4^f$	0,7532	0,9316	0,1784

*Примітка.* Дані про значення показника ФН до кільцювання мережі взяті з [49, с. 43].

Друга таблиця призначена для порівняльного аналізу за відносними показниками. Як показник взята функціональна ненадійність (ПФнН), тобто ймовірність порушення безперервного постачання ЦП конкретному споживачу.



Таблиця 2.7 – Порівняльна таблиця відносної зміни функціональної надійності трубопровідної мережі внаслідок її кільцювання

Індекс споживача	Позначення ПФНН	Значення ПФНН		Відносне зниження ПФНН (разів)
		до кільцювання	після кільцювання	
1	$1 - P_1^f$	0,1626	0,0649	2,5054
2	$1 - P_2^f$	0,1124	0,0244	4,6066
3	$1 - P_3^f$	0,2468	0,0768	3,2135
4	$1 - P_4^f$	0,2468	0,0684	3,6082

Аналіз табл. 2.6 говорить про значне покращення ПФН стосовно кожного споживача мережі. Найбільший абсолютний приріст ПФН спостерігається стосовно споживача  $O_{\text{сп4}}$  ( $\Delta P_4^f = 0,1784$ ), найменший – стосовно споживача  $O_{\text{сп2}}$  ( $\Delta P_2^f = 0,0880$ ).

Порівняльний аналіз ПФН в абсолютних величинах не завжди відображує дійсне становище. Це пов'язане з нелінійністю імовірнісних залежностей, якими є всі показники ФН. Тому окрім аналізу абсолютних приростів ПФН, треба проводити й аналіз відносних, а вони показують, що саме споживач  $O_{\text{сп2}}$  має найвищий виграш від кільцювання мережі (ймовірність непостачання ЦП знизилась в 4,6066 рази).

Таким чином, порівняльний аналіз має сенс тільки стосовно конкретного споживача. Порівняння між самими споживачами є умовним. Проте загальний висновок про доцільність тієї або іншої структури трубопровідною мережі за критерієм функціональної надійності можна зробити завжди. Так, у нашому випадку кільцювання мережі призвело до загального покращення постачання ЦП. Цьому сприяло резервування постачання ЦП, обумовлене подвійним підключенням кожного споживача до трубопровідної мережі. Останнє найкраще реалізується за допомогою кільцювання.

\* \* \*

Виклад теоретичної основи методу АРЗ та його паралельна ілюстрація на конкретному прикладі стосувалися трубопровідної транспортної системи з одним джерелом ЦП. Використання методу АРЗ в разі двох і більше джерел ЦП не має ніяких принципових відмінностей:

послідовність етапів розрахунку функціональної надійності та їх основний зміст залишаються незмінними.

Відзначимо суттєві відмінності в застосуванні методу АРЗ для систем трубопровідного транспорту з декількома джерелами. Так, на 1-му етапі в задані початкового зваженого графа мережі буде присутня не одна, а декілька вершин, кожна з яких відповідає окремому джерелу ЦП.

На 4-му й 5-му етапах основний граф АРЗ і всі спрощені графи АРЗ успадковуватимуть всі вершини початкового графа мережі, що відповідають джерелам. При цьому спрощений граф АРЗ стосовно конкретного споживача повинен містити всі альтернативні маршрути транспортування ЦП від усіх джерел до цього споживача.

Побудова розрахункової моделі функціональної надійності трубопровідної транспортної мережі стосовно конкретного споживача (7-й етап) починатиметься з однієї точки, що паралельно з'єднується з усіма джерелами ЦП, утворюючи таким чином паралельну модель надійності. Кожна гілка такої моделі відповідає окремому джерелу.

Зміст 2-го, 3-го і 7-го методів АРЗ етапів залишається без змін.

## РОЗДІЛ 3

### СТРУКТУРНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАДІЙНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Підвищення функціональної надійності напірних трубопровідних транспортних систем (НТТС) – одне з найважливіших завдань, що стоїть перед експлуатаційниками й в розв'язанні якого зацікавлені всі суб'єкти системи транспортування. У цьому розділі будуть розглянуті існуючі структурні методи підвищення надійності, такі як резервування і установка перемичок. Для порівняння впливу структури мережі на її функціональну надійність використовують аналітичний метод АРЗ, розглянутий в попередньому розділі.

#### 3.1. Особливості магістральних трубопровідних транспортних систем і способи підвищення їх функціональної надійності

Магістраллю зазвичай називають головний напрям, основну лінію в шляхах сполучення; широку вулицю великого міста з інтенсивним рухом; головний кабель, дріт в електричних мережах, в телеграфному і телефонному зв'язку; головну трубу в каналізаційній або водопровідній мережі [4]. Слово магістраль походить від латинського *magistralis*, що означає – керуючий. Магістраль є першорядний елемент деякої системи, від якого функціонально залежать усі інші елементи системи.

Магістральним трубопровідним транспортом називають вид трубопровідного транспорту, що здійснює постачання цільового продукту (ЦП) від місць здобичі до місць переробки і споживання [4]. Відстань від джерела ЦП, як правило, вимірюється десятками и навіть сотнями кілометрів. Безумовно, гідравлічний опір магістральних трубопроводів сягає суттєвих значень. Тому транспортування ЦП здійснюють за допомогою потужного напору. Надалі не будемо акцентувати увагу на тому, що система транспортування є напірною.

Магістральний трубопровідний транспорт забезпечує перший ступінь в подачі продукту споживачам. На подальших ступенях основний потік продукту, що транспортується, за допомогою розподільних

трубопровідних систем послідовно дробиться на менш потужні потоки до тих пір, поки параметри потоку не задовольнятимуть вимоги кінцевих споживачів. При цьому постачальник прагне здійснити постачання з мінімальними сумарними витратами.

При багатоступінчастому розподілі потоків кожен попередню розподільну трубопровідну систему можна вважати магістральною по відношенню до всіх подальших.

Під поняттям «Магістральні трубопровідні транспортні системи» (МТТС) в контексті справжньої монографії розумітимемо не стільки трубопровідні системи з функціонально високим пріоритетом, скільки системи з підвищеною протяжністю трубопроводів. Саме підвищена протяжність є ключовим параметром систем, на які орієнтовано справжнє дослідження.

Таким чином, об'єктом даного дослідження є будь-яка трубопровідна транспортна система, що у своєму складі має трубопроводи підвищеної протяжності. Як такі можуть виступати наступні ділянки трубопровідних мереж напірних транспортних систем:

- трубопроводи до віддалених споживачів;
- відвідні колектори, що поставляють відпрацьовану воду на видалені заміські очисні споруди;
- водопроводи від забірних споруд до міської розподільної мережі;
- газопроводи від добувних свердловин до газорозподільних пунктів;
- воздуховоди від компресорної станції до віддалених об'єктів;
- практично всі трубопровідні ділянки магістральних транспортних систем [44].

Всі перераховані ділянки відіграють важливу роль у функціонуванні трубопровідної мережі й системи в цілому. Якщо в системі не передбачено резервування таких ділянок, то вихід з ладу одного з них, як правило, призводить до виходу з ладу всієї системи. При цьому система, будьто розподільна чи то магістральна, не тільки перестає відповідати своєму призначенню, але й стає об'єктом підвищеної небезпеки, здатним викликати екологічну катастрофу. У магістральних трубопровідних мережах вихід з ладу таких ділянок посилюється ще й масштабами втрат і шкоди.

«Незалежно від того, який цільовий продукт (газ, вода, нафта, тепло, стисле повітря, сипкі матеріали й т.ін.) транспортується системою, всі протяжні трубопровідні ділянки повинні мати підвищену надійність» [44].

Тільки високонадійні системи дозволяють забезпечити безаварійну експлуатацію систем і уникнути техногенної катастрофи.

При подальшому викладанні матеріалів дослідження всі ділянки підвищеної протяжності розподільних і магістральних мереж називатимемо магістральними трубопроводами.

Експлуатація магістральних трубопроводів стикається з проблемою великих відстаней. З одного боку, чим більше протяжність трубопроводної ділянки, тим більше функціональне навантаження несе ця ділянка і тим сильніше позначається технічний стан магістральної ділянки на загальному функціонуванні всієї системи. З іншого боку, чим більше протяжність трубопроводу, тим менше вірогідність його безаварійної роботи. Згідно теорії надійності, трубопровід нескінченної довжини взагалі непрацездатний.

Таким чином, чим довше трубопровід, тим гострішим є питання забезпечення його надійності. У зв'язку з особливою актуальністю даного питання виникає досить велика потреба в розробці методів підвищення функціональної надійності магістральних систем.

Найбільш очевидними методами підвищення надійності магістральних систем є методи, що спрямовані на підвищення міцності трубопроводів і збереження фізичних і хімічних властивостей матеріалу труб:

- збільшення товщини стінок магістральних трубопроводів;
- підвищення механічної міцності та корозійної стійкості матеріалу виготовлення труб;
- електрозахист трубопроводів від блукаючих струмів;
- анодний захист труб від корозії;
- ізоляція труб від агресивного середовища їх залягання та ін.

Перераховані методи дозволяють продовжити термін служби магістральних трубопроводів.

У процесі тривалої експлуатації трубопроводи засмічуються, замулюються і втрачають пропускну спроможність. Багато трубопроводних ділянок через різні причини можуть мати підвищений знос, виробничі дефекти або механічні пошкодження, які вимагають негайної заміни таких ділянок. Для відновлення та оновлення трубопроводів передбачаються регламентні профілактичні роботи. Щоб здійснити такі роботи, трубопровід з режиму експлуатації переводиться в режим реноваційних робіт на термін, достатній для їх якісного виконання. Термін реновації залежно від характеру й складності профілактичних робіт може коливатися

в межах від декількох годин до декількох діб і навіть тижнів. На цей період трубопровід має бути звільненим від цільового продукту, що також вимагає певного періоду часу, сумірного з періодом проведення самих робіт. Природно, цільовий продукт через таку ділянку мережі поставлятися споживачам не може, й споживач зазнає збиток. Аналогічна ситуація виникає й при проведенні непланових аварійних робіт.

Всі споживачі мережі розраховують на безперервне отримання цільового продукту, якщо тільки умовами договору на його постачання не обумовлене протилежне. Ряд споживачів, наприклад, підприємства з безперервним циклом виробництва, не можуть допустити перебоїв в постачанні навіть протягом декількох хвилин. Щоб на період проведення профілактичних робіт споживач не позбавлявся можливості отримувати цільовий продукт, структура мережі повинна передбачати альтернативні шляхи транспортування до споживача.

У практиці магістрального трубопровідного транспорту застосовують три структурні методи, що дозволяють, з одного боку, забезпечити можливість проведення аварійних і профілактичних робіт, з іншої – підвищити функціональну надійність всієї системи:

- метод резервування трубопроводів;
- метод установка додаткової запірної арматури;
- метод установки перемичок між паралельними трубопроводами.

### **3.2. Резервування магістральних трубопроводів**

Найпоширенішим методом, що забезпечує можливість проведення робіт з реновації трубопроводу підвищеної протяжності без переривання транспорту цільового продукту споживачеві, є резервування, тобто прокладка додаткових трубопроводів паралельно основному.

При резервуванні система існуючої запірної арматури повинна забезпечити функціональну незалежність всіх трубопроводів: переведення будь-якого трубопроводу з режиму функціонування в режим профілактичних або ремонтних робіт (тобто припинення транспортування через цей трубопровід ЦП) не повинне впливати на транспортування цільового продукту через решту трубопроводів. Такий метод дозволяє при проведенні профілактичних або аварійних робіт не тільки зберегти основне призначення системи (транспортувати цільовий продукт), але і підвищити функціональну надійність всієї системи.

У більшості випадків при резервуванні обмежуються спорудою тільки одного додаткового трубопроводу, тобто дублюють основний трубопровід. Як правило, спорудження двох паралельних трубопроводів

дозволяє вирішити проблему великих відстаней. Аналіз економічної ефективності показує, що спорудження третього, а тим більше четвертого, п'ятого і т.д., трубопроводів недоцільне: незначне збільшення функціональної надійності системи приводить до невиправданих матеріальних і трудових витрат. Виключенням, мабуть, є випадки, коли паралельні трубопроводи забезпечують підвищену пропускну спроможність.

Схема найпростішої магістральної трубопровідної системи, що складається з одного трубопроводу, показана на рис. 3.1. Тут засувка 1 призначена для регулювання подачі цільового продукту в трубопровід; засувка 2 – для регулювання подачі цільового продукту з трубопроводу до споживача. Її стан «закрито» дозволяє тримати під деяким натиском цільовий продукт в трубопроводі. Стани «закрито» засувки 1 і «відкрито» засувки 2 дозволяють звільняти трубопровід від цільового продукту самопливом для проведення профілактичних або аварійних робіт на трубопроводі. При цьому споживач частково або повністю позбавлений можливості отримувати цільовий продукт в період проведення профілактичних або аварійних робіт на трубопроводі або засувках.

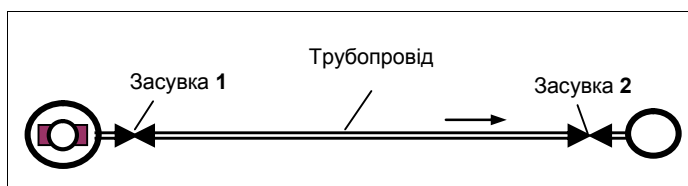


Рис. 3.1 – Схема найпростішої магістральної трубопровідної системи

Хай трубопровід має надійність  $p$ , а обидві засувки мають однакову технічну надійність  $p_a$ . Тоді розрахункова модель функціональної надійності магістрального трубопроводу матиме вигляд, показаний на рис. 3.2.

Послідовна модель надійності пояснюється тим, що користувач отримує цільовий продукт тільки тоді, коли працездатним є всі елементи системи: і засувки, і трубопровід. Споживач позбавлений можливості отримувати цільовий продукт у заданій кількості і якості тоді, коли хоч би один з елементів системи вийде з ладу.

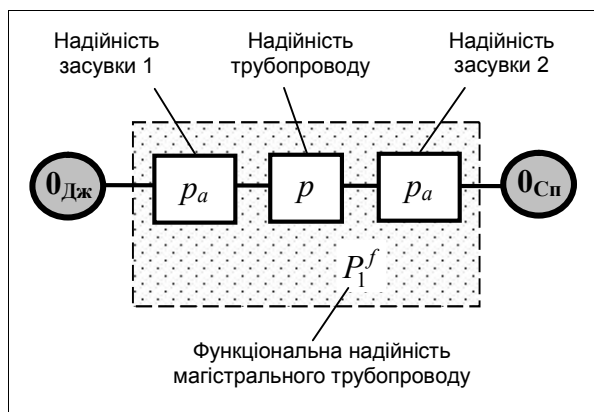


Рис. 3.2 – Розрахункова модель функціональної надійності найпростішого магістрального трубопроводу

Функціональна надійність системи (рис. 3.1), згідно моделі на рис. 3.2, визначиться виразом

$$P_1^f = p_a^2 \cdot p . \quad (3.1)$$

Типова схема магістральної трубопровідної системи, що складається з двох паралельних трубопроводів, показана на рис. 3.3. Тут призначення засувки 1 і 3 щодо трубопроводу 1 і засувки 2 і 4 щодо трубопроводу 2 таке ж, як у засувки 1 і 2 на рис. 3.1. Проте втрата працездатності трубопроводом 1 і засувкою 3 або трубопроводом 2 і засувкою 4 не приводить до припинення доступу цільового продукту до споживача.

Паралельні трубопроводи можуть споруджуватися фахівцями різної кваліфікації й мати відмінні один від одного матеріал, діаметр, ступінь зносу та інші параметри. У зв'язку з цим технічна надійність одного з паралельних трубопроводів може відрізнятися від технічної надійності іншого. Надалі для спрощення розрахунків вважатимемо, що обидва трубопроводи споруджувалися в один і той же час, в одних і тих же умовах і мають однакові технічні параметри, тобто технічна надійність одного трубопроводу дорівнює технічній надійності іншого.

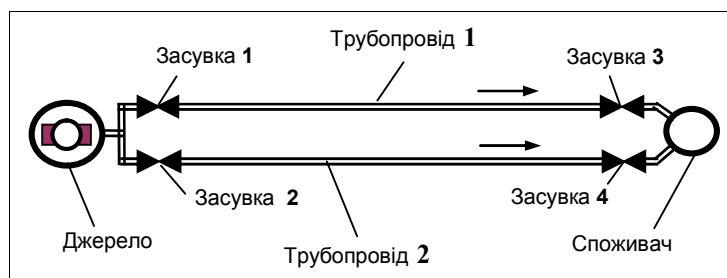


Рис. 3.3 – Схема дублювання магістрального трубопроводу



Нехай кожен з трубопроводів 1 і 2 має технічну надійність  $p$ , а кожна з чотирьох засувок 1, 2, 3 та 4 – технічну надійність  $p_a$ . Тоді модель функціональної надійності мережі з двох паралельних трубопроводів матиме вигляд, показаний на рис. 3.4.

Послідовна модель надійності трубопроводу 1 і засувки 3 пояснюється тим, що при проведенні ремонтних робіт на трубопроводі або засувці цільовий продукт через ланцюжок цих елементів не транспортується. Ланцюжок працездатний тільки тоді, коли обидва елементи справні. Те ж саме стосується трубопроводу 2 й засувки 4.

Паралельна модель надійності ланцюжка з трубопроводу 1 і засувки 3 з ланцюжком з трубопроводу 2 і засувки 4 пояснюється тим, що цільовий продукт може транспортуватися в системі до тих пір, поки хоча б один ланцюжок справний. Тільки вихід з ладу обох ланцюжків одночасно не дозволяє споживачеві отримувати цільовий продукт.

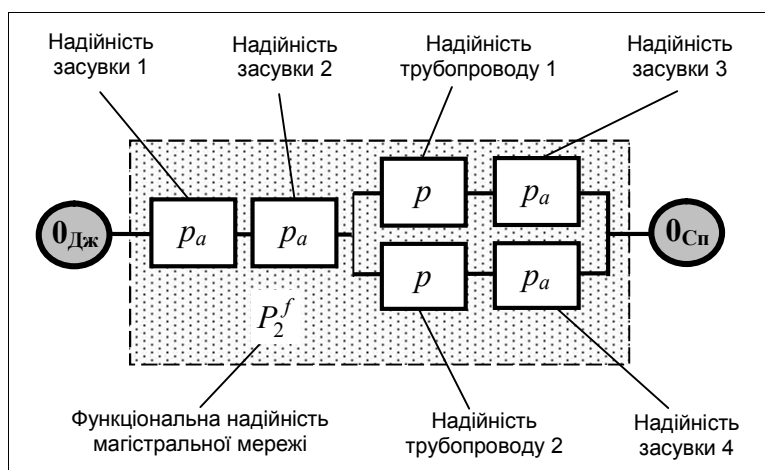


Рис. 3.4 – Розрахункова модель функціональної надійності мережі з двома паралельними трубопроводами

Послідовна модель надійності засувки 1 і 2 з системою паралельних ланцюжків пояснюється тим, що при виході з ладу хоча б однієї з цих засувки або системи ланцюжків транспортування цільового продукту здійснюватися вже не може. Система працездатна тільки тоді, коли обидві засувки справні, а паралельні ланцюжки дозволяють транспортувати цільовий продукт споживачеві.

Функціональна надійність системи на рис. 3.3, згідно з моделлю на рис. 3.4, визначається виразом

$$P_2^f = p_a^2 \cdot [1 - (1 - p \cdot p_a)^2] . \quad (3.2)$$

Аналогічна побудова моделі надійності для трубопровідної мережі з трьох паралельних трубопроводів (мал. 3.5) приводить до розрахункової формули

$$P_3^f = p_a^3 \cdot [1 - (1 - p \cdot p_a)^3] . \quad (3.3)$$

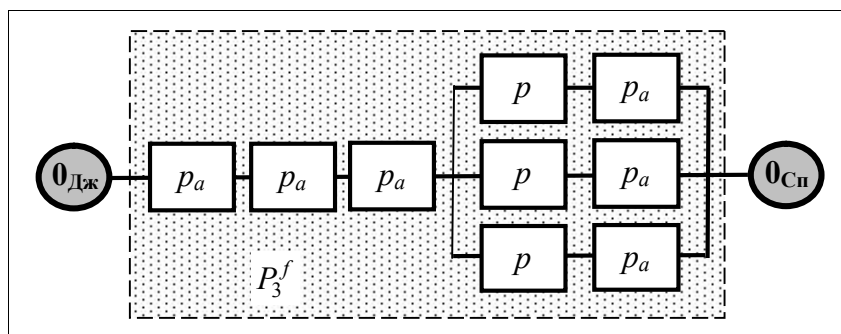


Рис. 3.5 – Розрахункова модель функціональної надійності мережі з трьома паралельними трубопроводами

У загальному випадку, коли система складається з  $n$  паралельних трубопроводів, її функціональна надійність визначається виразом

$$P_n^f = p_a^n \cdot [1 - (1 - p \cdot p_a)^n] . \quad (3.4)$$

У разі високої технічної надійності засувки ( $p_a \approx 1$ ) формула (3.4) спрощується:

$$P_n^f = 1 - (1 - p)^n . \quad (3.5)$$

При  $n = 2$ , тобто при елементарному резервуванні (дублюванні) трубопроводу, спрощена математична модель (3.5) приймає вигляд

$$P_2^f = 1 - (1 - p)^2 . \quad (3.6)$$

Табл. 3.1 демонструє ефект підвищення функціональної надійності магістральної мережі за рахунок резервування трубопроводу при різних значеннях технічної надійності одного трубопроводу  $p$  й різного ступеня резервування  $n$ .

Таблиця 3.1 – Функціональна надійність магістральної мережі

Технічна надійність трубопроводу, $n = 1$	Два паралельні трубопроводи, $n = 2$		Три паралельні трубопроводи, $n = 3$		Чотири паралельні трубопроводи, $n = 4$	
$p$	$P_2^f$	$k_2^f$	$P_3^f$	$k_3^f$	$P_4^f$	$k_4^f$
0,01	0,0199	1,99	0,0297	2,97	0,0394	3,94
0,1	0,19	1,9	0,271	2,71	0,3439	3,44
0,3	0,51	1,7	0,657	2,19	0,7599	2,533
0,5	0,75	1,5	0,875	1,75	0,9375	1,875
0,7	0,91	1,3	0,973	1,39	0,9919	1,417
0,9	0,99	1,1	0,999	1,11	0,9999	1,111
0,99	0,9999	1,01	0,999999	1,0101	0,99999999	1,010101

Дані в табл. 3.1 отримані в припущенні, що  $p_a = 1$ . Таблична величина  $k_i^f$  є коефіцієнтом підвищення надійності, що показує, в скільки разів збільшилася функціональна надійність системи за рахунок резервування трубопроводу.

Згідно з табл. 3.1, найвищий ефект збільшення надійності за рахунок резервування спостерігається при малій технічній надійності трубопроводів.

Оскільки  $\lim_{p \rightarrow 0} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = 1$ , то функціональна надійність за рахунок резервування може бути підвищена більш, ніж в  $n$  раз, за рахунок дублювання (два трубопроводи) – не більш, ніж в 2 рази, за рахунок двократного резервування (три трубопроводи) – не більш, ніж в 3 рази; за рахунок триразового резервування (чотири трубопроводи) – не більш, ніж в 4 рази; і т.д. (див. Додаток А.1.).

При високій технічній надійності трубопроводу ( $p \approx 1$ ) ефект підвищення функціональної надійності системи за рахунок резервування повністю відсутній, оскільки  $\lim_{p \rightarrow 1} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 1} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = 1$  (див. Додаток А.2.).

На рис. 3.6 і 3.7 наведено графіки функціональної надійності та коефіцієнтів  $k_i^f$  ( $i=2,3,4$ ), залежно від технічної надійності одного трубопроводу  $p$ . Осьова лінія на рис. 3.6 відповідає умовній функціональній надійності системи, тобто надійності системи за умови відсутності резервування (у системі всього один трубопровід). Осьова лінія на рис. 3.7 відповідає умовному коефіцієнту підвищення надійності  $k_1^f$  за відсутності резервування. У цьому випадку  $k_1^f = 1 = \text{const}$ . Пунктирні ділянки графіків говорять про їх неадекватність, оскільки статистико-аналітичні методи розрахунку функціональної надійності мають сенс тільки для систем з простими потоками відмов, тобто при значеннях  $p$ , близьких до одиниці.

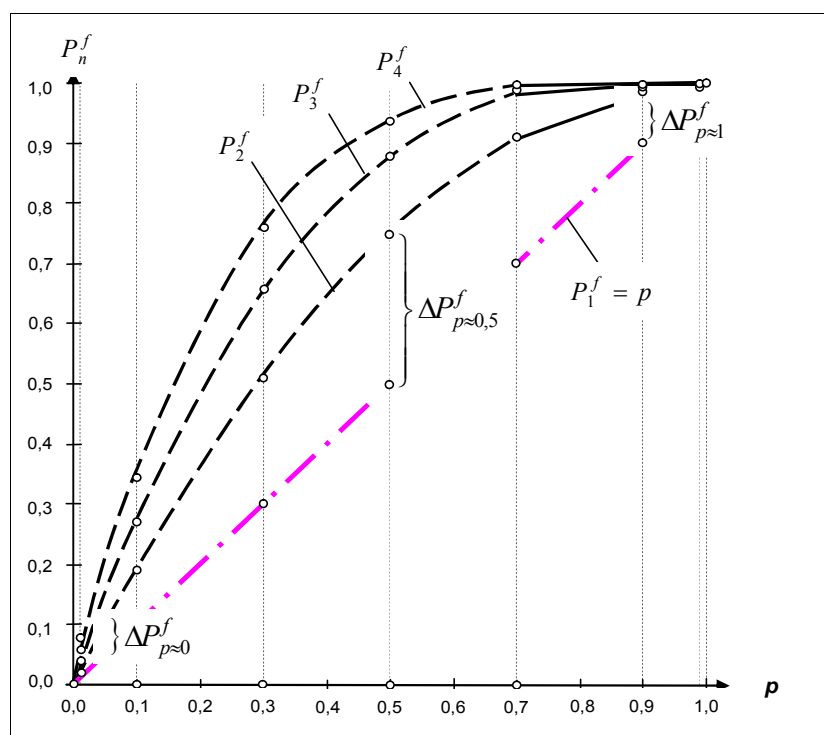


Рис. 3.6 – Графіки залежності функціональної надійності трубопроводу від його технічної надійності й ступеня резервування

Графіки на рис. 3.6 наочно демонструють, що при значеннях технічної надійності близьких до нуля ( $p \approx 0$ ) та одиниці ( $p \approx 1$ ) приріст функціональної надійності за рахунок резервування менший, ніж при значеннях  $p$  з середнього діапазону ( $0,05 \leq p \leq 0,95$ ). Так,

$$\Delta P_{p \approx 0,5}^f > \begin{cases} \Delta P_{p \approx 0}^f; \\ \Delta P_{p \approx 1}^f. \end{cases}$$

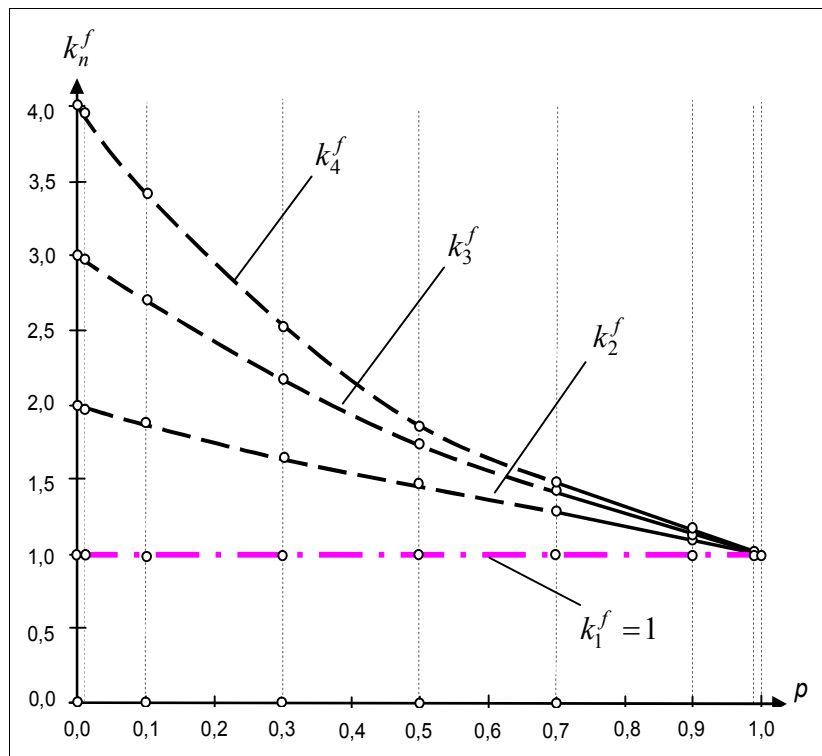


Рис. 3.7 – Графіки залежності коефіцієнта підвищення функціональної надійності трубопроводу від його технічної надійності й ступеня резервування

Найбільший ефект підвищення функціональної надійності системи при дублюванні трубопроводу ( $\Delta P_2^f = 0,25$ ) спостерігається при  $p_2^* = 0,5$ . Тут екстремальне значення  $p_2^*$  є рішенням задачі одновимірної оптимізації при двосторонній обмеженості змінною (Додаток В.1):

$$p_2^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_2^f - p) \right] = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^2] - p \} \right].$$

Найбільший ефект підвищення функціональної надійності системи при двократному резервуванні (три паралельні трубопроводи) спостерігається при  $p_3^* = 0,423$  і становить приблизно 0,385 ( $\Delta P_3^f \approx 0,385$ ). Тут екстремальне значення  $p_3^*$  є рішенням задачі одновимірної оптимізації при двосторонній обмеженості змінною (Додаток В.2):

$$p_3^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_3^f - p) \right] = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^3] - p \} \right].$$

Найбільший ефект підвищення функціональної надійності системи при триразовому резервуванні (чотири паралельні трубопроводи) спостерігається при  $p_4^* = 0,37$  і становить  $0,4725$  ( $\Delta P_4^f = 0,4725$ ). Тут екстремальне значення  $p_4^*$  є рішенням задачі одновимірної оптимізації при двосторонній обмеженості змінною (Додаток В.3):

$$p_4^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_4^f - p) \right] = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^4] - p \} \right].$$

Як бачимо, із зростанням ступеня резервування  $n$  максимальний ефект підвищення функціональної надійності досягається при менших значеннях технічної надійності трубопроводу  $p$ :  $p_4^* < p_3^* < p_2^*$ , а абсолютний приріст функціональної надійності при цьому зростає ( $\Delta P_4^f > \Delta P_3^f > \Delta P_2^f$ ).

Аналіз графіків  $k_n^f(p)$  на рис.3.7 говорить про слабку ефективність резервування при високій технічній надійності трубопроводу, тобто при  $p \approx 1$ . Якщо до того ж додати, що на споруду кожного додаткового трубопроводу витрачаються ресурси в кількостях, сумірних з їх витратами на споруду основного трубопроводу, то недоцільність споруди більш одного додаткового трубопроводу стає очевидною.

Найважливішим результатом резервування є можливість проводити профілактичні і ремонтні роботи на трубопроводах без припинення постачання цільового продукту споживачеві. Для досягнення такого результату досить обмежитися дублюванням основного трубопроводу.

### **3.3. Установка додаткових засувки як засіб підвищення функціональної надійності**

Багатократне резервування вимагає значних витрат матеріальних, фінансових і трудових ресурсів. При цьому із зростанням числа додаткових паралельних трубопроводів ефект підвищення функціональної надійності стрімко падає. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці й використанні інших методів структурного підвищення функціональної надійності системи.

Одним з найбільш простих структурних методів підвищення функціональної надійності є установка додаткової високонадійної запірної

арматури. На рис. 3.8 зображена схема системи з елементарним резервуванням (дублюванням) трубопроводів, що посилена двома додатковими засувками  $a_{д1}$  і  $a_{д2}$ .

Засувка  $a_{д1}$  розбиває перший з двох паралельних трубопроводів на дві ділянки:  $t_1$  і  $t_3$ . Засувка  $a_{д2}$  розбиває другий трубопровід на ділянки  $t_2$  і  $t_4$ . Підвищення функціональної надійності за допомогою додаткових засувки можлива тільки при їх високій технічній надійності ( $p_{a_{д1}}, p_{a_{д2}} \approx 1$ ). Максимальний ефект підвищення надійності спостерігається при симетричній установці засувки в системі, тобто при рівних довжинах трубопровідних ділянок  $t_1, t_2, t_3$  і  $t_4$ .

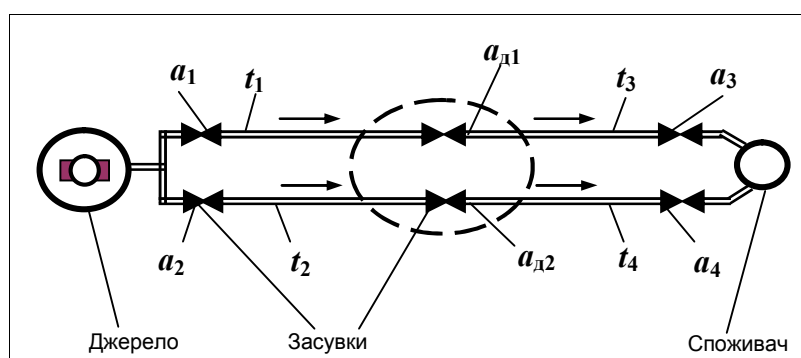


Рис. 3.8 – Схема дублювання магістрального трубопроводу з установкою додаткової запірної арматури

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з додатковими засувками наведений на рис. 3.9.

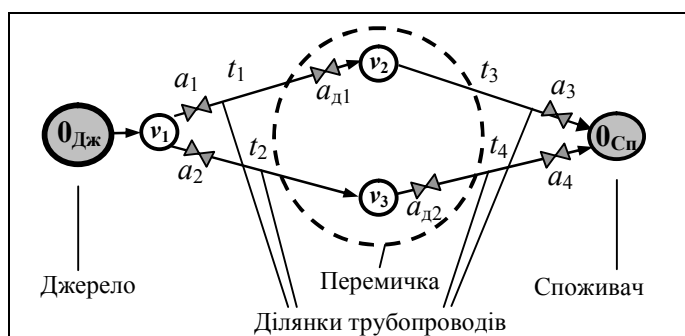


Рис. 3.9– Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з додатковою запірною арматурою

У табл. 3.2 наведені дані, що відображають розбиття системи на аварійно-ремонтні зони (АРЗ). Розбиття проводили за алгоритмом, викладеному в [55].

Таблиця 3.2 – Дані про розбиття магістральної системи на аварійно-ремонтні зони

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2} \quad (t_1)$	$a_1, a_{д1}$	—
2	$e_{1,3} \quad (t_2)$	$a_2, a_{п2}$	$v_3$
3	$e_{2,О_{Сп}} \quad (t_3)$	$a_{д1}, a_3$	$v_2$
4	$e_{3,О_{Сп}} \quad (t_4)$	$a_{д2}, a_4$	—
5	—	$a_1, a_2$	$v_1$

На рис. 3.10 зображений граф АРЗ, що відповідає проведеному розбиттю.

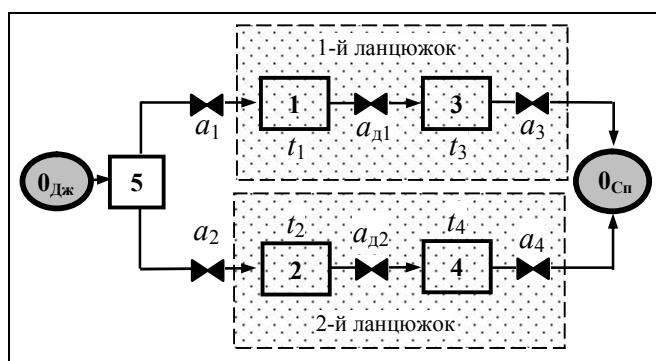


Рис. 3.10 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів з додатковою запірною арматурою

Наступний етап розрахунку функціональної надійності – синтез моделі надійності згідно графу АРЗ – розглянемо детальніше.

Нехай  $p$  – технічна надійність кожного з двох паралельних трубопроводів без установки додаткових засувки  $a_{д1}$  і  $a_{д2}$ ;  $p_i$  – технічна



надійність  $i$ -ї трубопровідної ділянки  $t_i$  або, що те ж саме, надійність  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{ai}$  – технічна надійність  $i$ -ї засувки,  $i = \overline{1,2}$ ;  $p_{dj}$  – технічна надійність  $j$ -ї додаткової засувки.

Ділянкам  $t_1$  (АРЗ №1) і  $t_3$  (АРЗ №3) разом із засувками  $a_{d1}$  і  $a_3$  (1-й ланцюжок у графі АРЗ на рис. 3.10) відповідає послідовна модель надійності, оскільки ланцюжок працездатний тільки тоді, коли справні одночасно елементи  $t_2$  та  $a_3$  (рис. 3.11). Те саме можна сказати про 2-й ланцюжок, що складається з ділянок  $t_2$  (АРЗ №2) і  $t_4$  (АРЗ №4) разом із засувками  $a_{d2}$  та  $a_4$ .

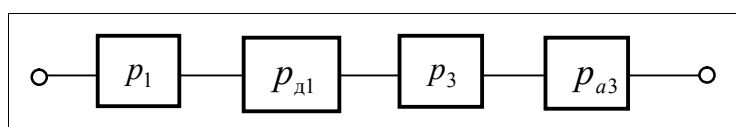


Рис. 3.11 – Послідовна модель надійності 1-го ланцюжка

Фрагменту системи, що складається з 1-го і 2-го ланцюжків, відповідає паралельна модель надійності (рис. 3.12). Пояснюється це тим, що цільовий продукт транспортуватиметься споживачеві тоді, коли хоча б один з ланцюжків знаходиться у працездатному стані.

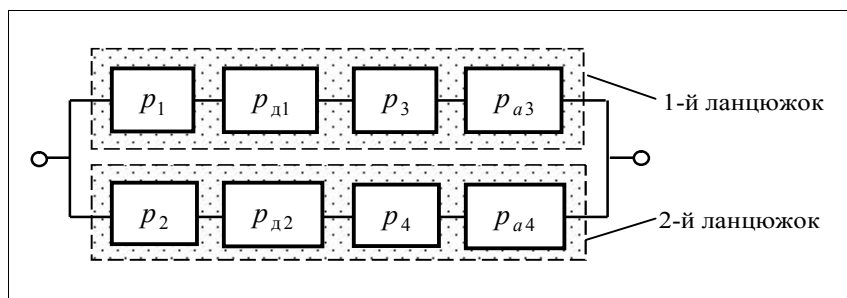


Рис. 3.12 – Паралельна модель надійності

Цільовий продукт поступатиме споживачеві, якщо одночасно будуть працездатними АРЗ №5, засувки  $a_1$  і  $a_2$ , а також фрагмент системи, відповідний двом паралельним ланцюжкам. Тому вказаним елементам відповідає послідовна модель надійності, що зображена на рис. 3.13.

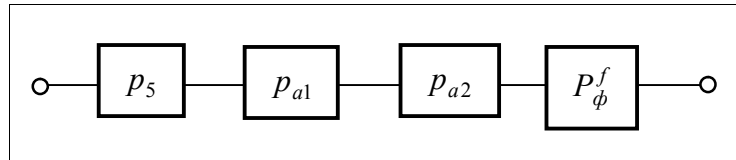


Рис. 3.13 – Послідовна модель надійності

На рис. 3.13 величина  $P_{\phi}^f$  визначає функціональну надійність фрагмента системи, відповідного двом паралельним ланцюжкам (рис. 3.12). Таким чином, повна модель функціональної надійності системи, синтезованої згідно з графом АРЗ (рис. 3.10), відповідатиме змішаній моделі надійності, що зображена на рис. 3.14.

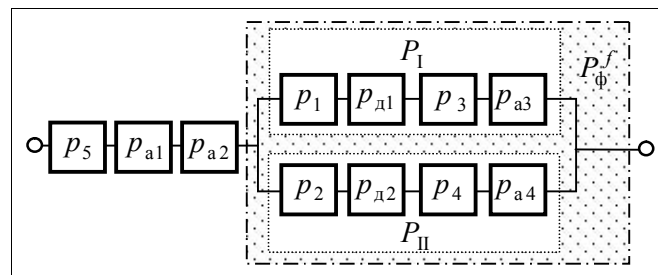


Рис. 3.14 – Змішана модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з додатковими засувками

Надійність 1-го ланцюжка (рис. 3.11) системи, згідно теорії надійності технічних систем, визначається виразом

$$P_I = p_1 p_{d1} p_3 p_{a3}.$$

Аналогічно визначається надійність 2-го ланцюжка:

$$P_{II} = p_2 p_{d2} p_4 p_{a4}.$$

Надійність фрагмента системи складе

$$P_{\phi}^f = 1 - (1 - P_I)(1 - P_{II}) = 1 - (1 - p_1 p_{d1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{d2} p_4 p_{a4}).$$

$$P_{\phi}^f = 1 - (1 - P_I)(1 - P_{II}) = 1 - (1 - p_1 p_{d1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{d2} p_4 p_{a4}).$$

Нарешті, функціональна надійність всієї системи визначиться таким чином:

$$P_{2+2д}^f = p_5 p_{a1} p_{a2} P_{\Phi}^f = p_5 p_{a1} p_{a2} \left[ 1 - (1 - p_1 p_{д1} p_3 p_{a3}) (1 - p_2 p_{д2} p_4 p_{a4}) \right]. \quad (3.7)$$

Вираз (3.7) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з двома додатковими засувками.

Технічною ненадійністю АРЗ №5 через порівняно невелику сумарну довжину трубопровідних ділянок (в порівнянні з АРЗ №1, №2, №3 або №4) можна нехтувати, тобто  $p_5 = 1$ .

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{ai} = p_{dj} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $j \in \overline{1,2}$ .

З урахуванням зроблених зауважень вираз (3.6) набуває вигляду

$$P_{2+2д}^f = p_a^2 \left[ 1 - (1 - p_1 p_a^2 p_3) (1 - p_2 p_a^2 p_4) \right]. \quad (3.8)$$

Сумарна довжина трубопровідних ділянок кожної з АРЗ №1, №2, №3 або №4 у 2 рази менше довжини кожного з двох паралельних трубопроводів в системі на рис. 3.3. Тому частота відмов (ненадійність) в АРЗ №1, №2, №3 або №4 буде в 2 рази менше частоти відмов трубопроводу:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p).$$

Звідси

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2}. \quad (3.9)$$

Підставляючи в (3.8) замість  $p_2$  і  $p_4$  їх вираз через  $p$ , отримаємо

$$P_{2+2д}^f = p_a^2 \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1 + p}{2} \right)^2 p_a^2 \right]^2 \right\}. \quad (3.10)$$

Вираз (3.10) є спрощеною математичною моделлю функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з двома додатковими засувками. За абсолютною надійністю засувки ( $p_a = 1$ ) математична модель набуває вигляду

$$P_{2+2д}^f = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (3.11)$$

Якщо тепер порівняти функціональну надійність системи двох паралельних трубопроводів, що розрахована за формулою (3.6), з функціональною надійністю тієї ж системи, але з додатковими засувками, що розрахована за формулою (3.11), то побачимо незначне підвищення надійності  $\Delta P_{2д}^f$  (табл. 3.3) й зменшення ймовірності виходу з ладу.

Таблиця 3.3 – Порівняльна таблиця до ілюстрації ефекту підвищення функціональної надійності (ФН) системи за рахунок додаткових засувок

Технічна надійність трубопроводу, $p$	ФН системи		Приріст ФН		Зменшення ненадійності	
	Без додат. засувки, $P_2^f$	З додат. засувками, $P_{2+2д}^f$	Абсолютний, $\Delta P_2^f$	Відносний, $\frac{\Delta P_2^f \cdot 100\%}{P_2^f}$	Абсолютне, $\Delta(1 - P_2^f)$	Відносне, $\frac{\Delta(1 - P_2^f) \cdot 100\%}{(1 - P_2^f)}$
0,7	0,91	0,923	0,013	1,43%	-0,013	-14,4%
0,8	0,96	0,9639	0,0039	0,41%	-0,0039	-9,75
0,9	0,99	0,9905	0,0005	0,05%	-0,0005	-5%

Якщо технічна надійність всіх засувки в системі однакова, але менша за одиницю, то збільшення функціональної надійності спостерігатиметься у меншій мірі й тільки за умови

$$p_a > \frac{4p}{(1+p)^2}.$$

Малий приріст функціональної надійності або зменшення ненадійності системи за рахунок установки додаткових засувки вимагає пошуку більш ефективніших структурних методів підвищення надійності.

### 3.4. Установка перемички між паралельними трубопроводами як засіб підвищення функціональної надійності

Після елементарного резервування (дублювання) трубопроводу і установки додаткових засувки подальшого підвищення функціональної

надійності можна досягти за рахунок установки перемичок між двома паралельними трубопроводами.

Перемички мають порівняно малу довжину трубопровідної частини (декілька метрів), унаслідок чого її технічна надійність значно перевершує технічну надійність трубопроводів, які з'єднуються цими перемичками. При початковій оцінці функціональної надійності системи з використанням перемичок технічну надійність останніх доцільно прирівняти одиниці.

На рис. 3.15 наведена схема пристрою перемички з п'ятьма засувками при її використанні в умовах елементарного резервування, тобто при з'єднанні двох паралельних трубопроводів.

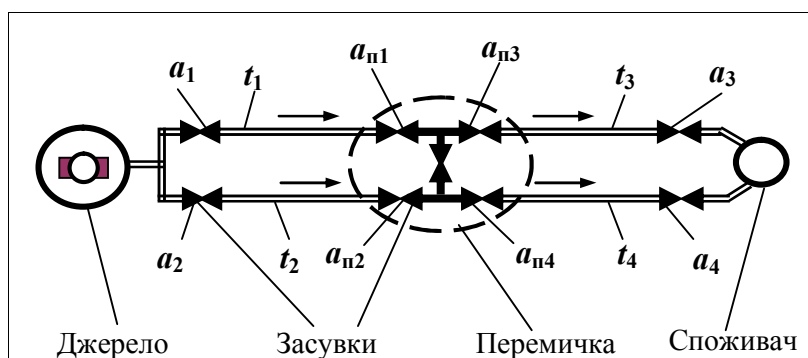


Рис. 3.15 – Місце в системі та устрій перемички

Перемичка розбиває систему двох паралельних трубопроводів на чотири трубопровідні ділянки:  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  та  $t_4$ . У разі потреби кожна ділянка може бути відсічена від джерела за допомогою однієї або декількох засувок: перша ділянка  $t_1$  – засувками  $a_1$  і  $a_{н1}$ ; друга  $t_2$  –  $a_2$  і  $a_{н2}$ ; третя  $t_3$  –  $a_{н3}$ ; четверта  $t_4$  –  $a_{н4}$ .

Розташування п'яти засувок в одному колодязі дозволяє:

- керувати потоками цільового продукту, використовуючи для його транспортування від джерела до споживача різні ділянки системи (рис. 3.16);
- відключати від системи будь-яку з чотирьох ділянок або декілька ділянок в різних поєднаннях;
- забезпечувати безперервне постачання ЦП споживачеві при проведенні аварійних або профілактичних робіт;
- вибирати один з дев'яти можливих маршрутів транспортування цільового продукту (рис. 3.16);

- прискорювати звільнення від ЦП ділянки 1 або 2, спрямовуючи його до споживача одночасно через ділянки 3 і 4;
- забезпечувати ремонт або заміну будь-якої із засувок перемички, окрім центральної, без переривання постачання цільового продукту споживачеві.

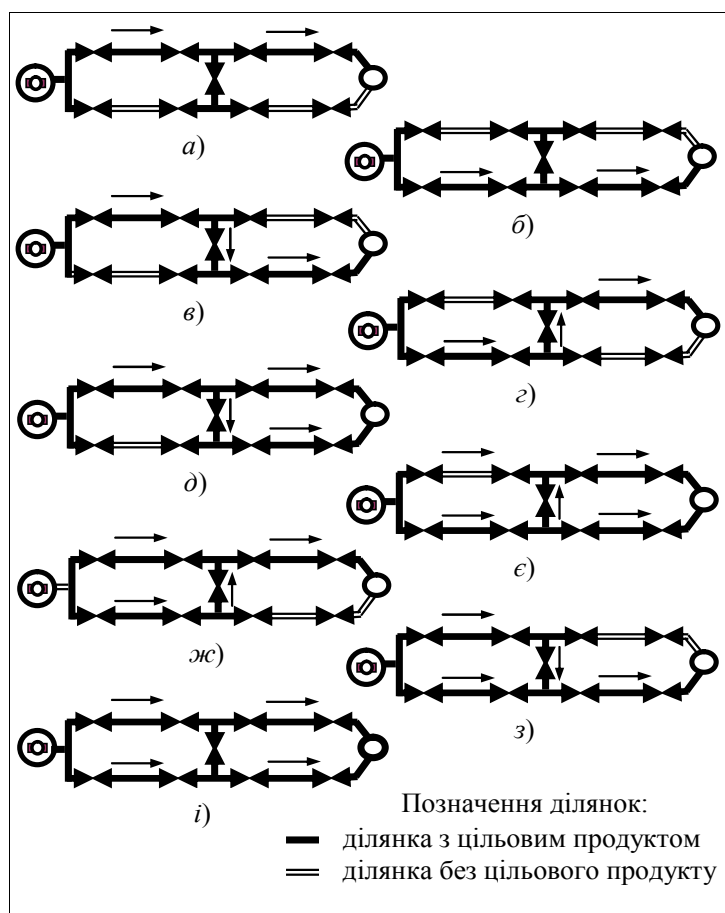


Рис. 3.16 – Можливі потоки й маршрути транспорту цільового продукту через два паралельних трубопроводи з однією перемичкою

Перераховані функціональні можливості перемички, безумовно, не є вичерпними. Перелік можливостей слід доповнити ще принаймні однією, не менш суттєвою можливістю, а саме: перемичка з п'ятьма засувками підвищує функціональну надійність системи.

Для порівняльного аналізу ступеня підвищення функціональної надійності проведемо повний її розрахунок методом АРЗ.

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з однією перемичкою цього типу (з п'ятьма засувками) зображений на рис. 3.17.

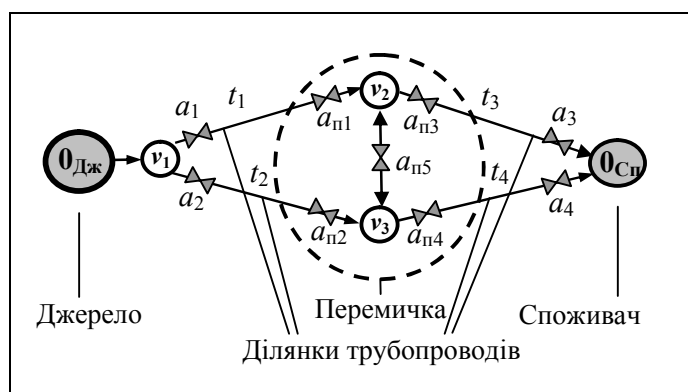


Рис. 3.17– Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, з'єднаних однією перемичкою з п'ятьма засувками

У табл. 3.4 зведені дані, що відображають розбиття системи на зони за алгоритмом методу АРЗ.

Щоб початковий граф системи (рис. 3.17) відповідав вимогам алгоритму, треба для дуги, що відповідає перемичці, встановити значення вагової функції  $z_{2,3}$  рівним 1 (засувка  $a_{п5}$  знаходиться в початковому колодязі  $v_2$  труби перемички) або 2 (засувка  $a_{п5}$  знаходиться в кінцевому колодязі  $v_3$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{2,3} = 1$  та  $z_{2,3} = 2$  указують на одне і те ж розташування засувки.

Таблиця 3.4 – Розбиття магістральної системи на аварійно-ремонтні зони

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2} (t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{1,3} (t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{2,0_{Сп}} (t_3)$	$a_{п3}, a_3$	—
4	$e_{3,0_{Сп}} (t_4)$	$a_{п4}, a_4$	—
5	$e_{2,3}$ , якщо $z_{2,3}=2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{п5}$	$v_2$
6	$e_{2,3}$ , якщо $z_{2,3}=1$	$a_{п2}, a_{п4}, a_{п5}$	$v_3$
7	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. 3.18.

Наступний етап розрахунку функціональної надійності – синтез моделі надійності за графом АРЗ, розглянемо детальніше.

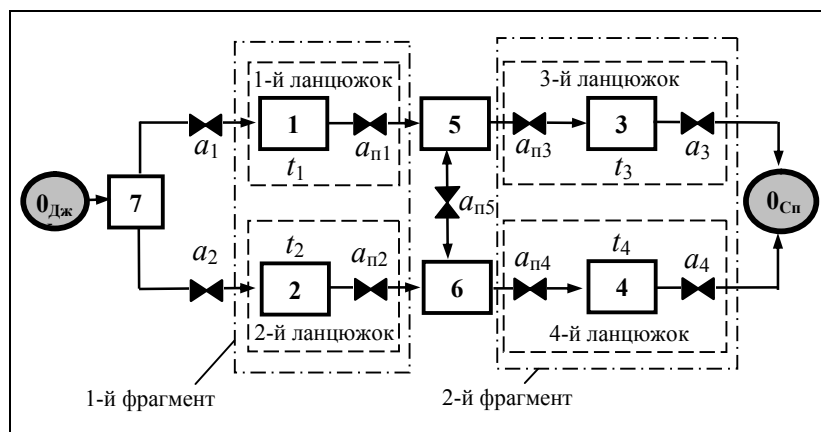


Рис. 3.18 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, з'єднаних однією перемичкою з п'ятьма засувками

Нехай  $p_i$  – технічна надійність трубопровідної ділянки,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{ai}$  – технічна надійність засувки,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{пj}$  – технічна надійність засувки, що належить перемичці,  $j = \overline{1,5}$ .

Ділянці  $t_1$  і засувці  $a_{п1}$  (1-й ланцюжок у графі АРЗ на рис. 3.18) відповідає послідовна модель надійності, оскільки ланцюжок працездатний тільки тоді, коли справні обидва елементи  $t_1$  і  $a_{п1}$  (рис.3.19).

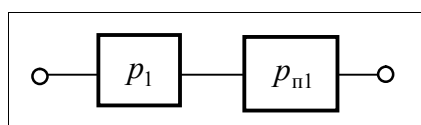


Рис. 3.19 – Послідовна модель надійності

Те ж саме можна сказати про 2-й ланцюжок, що складається із засувки  $a_{п2}$  та трубопровідної ділянки  $t_2$ .

Фрагменту системи, що складається з 1-го і 2-го ланцюжків, відповідає паралельна модель надійності (рис. 3.20), оскільки цільовий продукт транспортуватиметься споживачеві тоді, коли хоча би один з ланцюжків знаходиться у працездатному стані.



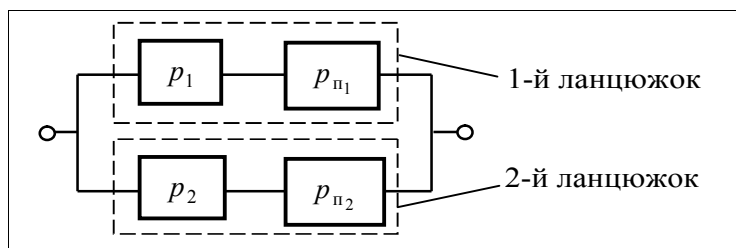


Рис. 3.20 – Паралельна модель надійності 1-ої та 2-ої ділянок системи

Надійність 1-го фрагмента системи, згідно з теорією надійності технічних систем, визначається виразом

$$P_I = 1 - (1 - p_1 p_{п1})(1 - p_2 p_{п2}). \quad (3.12)$$

Аналогічно визначається надійність 2-го фрагмента системи, що складається з 3-го і 4-го ланцюжків елементів:

$$P_{II} = 1 - (1 - p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_{п4} p_4 p_{a4}). \quad (3.13)$$

Якщо одна із зон №5 і №6 вийде з ладу, то постачання ЦП споживачеві в системі не припиниться. Тільки одночасний вихід з ладу обох зон спричинить припинення транспортування ЦП. Тому цим зонам (3-у фрагменту системи) відповідає паралельна модель надійності, що зображена на рис. 3.21.

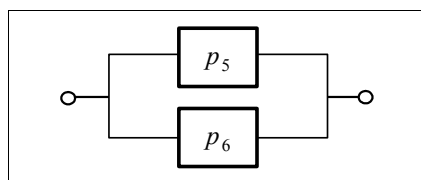


Рис. 3.21 – Паралельна модель надійності АРЗ №5 і №6

Надійність 3-го фрагмента системи становить

$$P_{III} = 1 - (1 - p_5)(1 - p_6). \quad (3.14)$$

Всі три фрагменти системи сумісно із засувками  $a_1$ ,  $a_2$  і  $a_{п5}$  утворюють послідовну модель надійності (рис. 3.22), оскільки для проведення аварійно-ремонтних робіт внаслідок виходу з ладу будь-якого

з розглянутих фрагментів системи або будь-якою з вказаних засувок необхідно припинити постачання цільового продукту споживачеві.

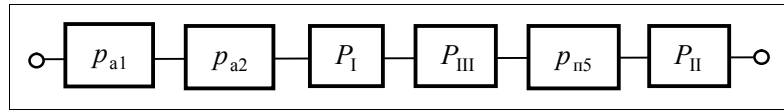


Рис. 3.22 – Послідовна модель надійності фрагментів системи, вхідних засувок  $a_1$  і  $a_2$  і центральної засувки перемички  $a_{n5}$

На рис. 3.23 показана повна модель функціональної надійності системи, синтезованої за графом АРЗ (рис. 3.18).

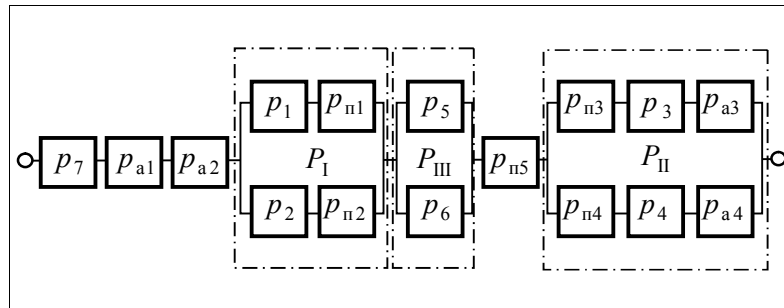


Рис. 3.23 – Змішана модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою з п'ятьма засувками

Таким чином, остаточний вираз функціональній надійності всієї системи набуває вигляду

$$P_{2+n1}^f = p_7 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{n1})(1 - p_2 p_{n2})] p_{n5} \times \\ \times [1 - (1 - p_5)(1 - p_6)][1 - (1 - p_{n3} p_3 p_{a3})(1 - p_{n4} p_4 p_{a4})]. \quad (3.15)$$

Технічною ненадійністю АРЗ №5, №6 і №7 через порівняно невелику сумарну довжину трубопровідних ділянок (в порівнянні з АРЗ №1, №2, №3 або №4) можна нехтувати, тобто

$$p_5 = p_6 = p_7 = 1. \quad (3.16)$$

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати

$$p_{ai} = p_{\pi j} = p_a, \quad i \in \overline{1,4}, \quad j \in \overline{1,5}. \quad (3.17)$$

Умовна нульова довжина труби перемички і однакові умови спорудження і експлуатації трубопровідних ділянок системи диктують рівності:  $p_1 = p_2$ ;  $p_3 = p_4$ . Більше того, як буде обґрунтовано пізніше, найбільш раціональне розташування перемички в системі є симетричним, тобто технічні надійності ділянок  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  й зв'язані рівністю

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_{\text{ту}}, \quad (3.18)$$

де  $p_{\text{ту}}$  – технічна надійність трубопроводу завдовжки в два рази коротше за кожного з двох паралельних трубопроводів системи.

З урахуванням (3.16) – (3.18) вираз (3.15) набуває вигляду

$$P_{2+\pi 1}^f = p_a^3 [1 - (1 - p_{\text{ту}} p_a)^2] [1 - (1 - p_{\text{ту}} p_a^2)^2]. \quad (3.19)$$

Якщо вважати, що технічна надійність засувки  $p_a$  значно перевершує надійність протяжних трубопроводів, тобто припустити рівність  $p_a = 1$ , то вираз (3.19) трансформується у просту формулу

$$P_{2+\pi 1}^f = [1 - (1 - p_{\text{ту}})^2]^2, \quad (3.20)$$

що дозволяє проводити порівняльний аналіз систем з перемичкою або без такої за критерієм функціональної надійності.

Для порівняльного аналізу скористаємося формулою (3.6):

$$P_2^f = 1 - (1 - p)^2,$$

де  $p$  – технічна надійність кожного з двох паралельних трубопроводів.

Для порівняння величин  $P_2^f$  і  $P_{2+\pi 1}^f$  необхідно встановити взаємозв'язок між  $p$  і  $p_{\text{ту}}$ . Оскільки  $p_{\text{ту}}$  визначає технічну надійність симетричних трубопровідних ділянок завдовжки в 2 рази коротше за довжину одного з двох паралельних трубопроводів, то частота відмов (ненадійність) на такій ділянці буде в 2 рази менше частоти відмов на всьому трубопроводі:

$$(1 - p_{\text{ту}}) = \frac{1}{2}(1 - p).$$

Звідси

$$p_{\text{ту}} = \frac{1 + p}{2}. \quad (3.21)$$

Підставляючи (3.21) в (3.20), маємо

$$P_{2+n1}^f = \left( \frac{3 + 2p - p^2}{4} \right)^2. \quad (3.22)$$

Вирази (3.20) – (3.22) отримані за умови з'єднання двох паралельних трубопроводів однією перемичкою з п'ятьма засувками. У загальному випадку, коли трубопроводи з'єднуються перемичками однакової конструкції в кількості  $n$ , вирази (3.20) – (3.22) відповідно набудуть вигляду:

$$P_{2+nm}^f = \left[ 1 - (1 - p_{\text{ту}})^2 \right]^{n+1}; \quad (3.23)$$

$$p_{\text{ту}} = \frac{n + p}{n + 1}; \quad (3.24)$$

$$P_{2+nm}^f = \left[ 1 + \left( \frac{1 - p}{n + 1} \right)^2 \right]^{n+1}. \quad (3.25)$$

Приведені формули припускають симетричну установку в системі всіх  $n$  перемичок, тобто перемички розбивають кожен з двох паралельних трубопроводів на рівні по довжині ділянки в кількості  $(n + 1)$ .

У табл. 3.5 зведені значення функціональної надійності, розраховані за формулою (3.25), і відповідні коефіцієнти підвищення функціональної надійності  $k_n^f$  при  $n = 0, 1, 2, 3$ .

Аналіз табл. 3.2 і 3.3 показує, що в діапазоні робочої ймовірності безвідмовної роботи трубопроводів  $(0,7 \leq p \leq 0,9)$  ефект підвищення функціональної надійності за рахунок спорудження третього паралельного трубопроводу такий же, як при з'єднанні двох паралельних трубопроводів двома перемичками.

Таблиця 3.5 – Функціональна надійність системи двох паралельних трубопроводів залежно від їх технічної надійності й кількості перемичок

Надій- ність $p$	Кількість перемичок $n$									
	$n = 0$		$n = 1$		$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	$P_2^f$	$k_0^f = \frac{P_2^f}{p}$	$P_{2+n1}^f$	$k_1^f = \frac{P_{2+n1}^f}{p}$	$P_{2+n2}^f$	$k_2^f = \frac{P_{2+n2}^f}{p}$	$P_{2+n3}^f$	$k_3^f = \frac{P_{2+n3}^f}{p}$	$P_{2+n4}^f$	$k_4^f = \frac{P_{2+n4}^f}{p}$
0,01	0,02	1,99	0,5700	57,0	0,7067	70,76	0,7766	77,66	0,8188	81,876
0,1	0,19	1,9	0,6360	6,36	0,7536	7,536	0,8124	8,124	0,8482	8,482
0,3	0,51	1,7	0,7700	2,5667	0,8454	2,818	0,8830	2,943	0,9058	3,019
0,5	0,75	1,5	0,8789	1,7578	0,9190	1,838	0,9389	1,878	0,9510	1,902
0,7	0,91	1,3	0,9555	1,365	0,9703	1,4001	0,9777	1,3967	0,9821	1,403
0,9	0,99	1,1	0,9950	1,1056	0,9967	0,1071	0,9975	1,1083	0,9980	1,109
0,99	0,9999	1,01	0,99995	1,0101	0,99997	1,01007	0,99997	1,01008	0,99998	1,01008

Коли врахувати, що витрати на спорудження додаткового трубопроводу непорівнянно перевищують витрати на спорудження двох перемичок, то перевагу як методу підвищення функціональної надійності магістральних трубопроводних транспортних систем треба віддати установці перемичок. Тому даному методу буде приділено підвищену увагу.

Проте при надмірному збільшенні числа перемичок  $n$  при незмінних значеннях  $p_a$  і  $p$  додавання нових перемичок може спричинити зворотній ефект. Кожна додаткова перемичка потребує установки п'яти засувок, які хоч і трохи, але негативно впливають на функціональну надійність системи. При цьому позитивний вплив кожної нової перемички на функціональну надійність поступово знижується. Тому при збільшенні числа перемичок  $n$  обов'язково наступить такий момент, коли функціональна надійність буде не збільшуватиметься, а зменшуватиметься!

## РОЗДІЛ 4

### ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІІ ПЕРЕМИЧКИ ЗА КРИТЕРІЄМ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАДІЙНОСТІ

У попередньому розділі показано перевагу установки перемички в магістральних трубопровідних транспортних системах в порівнянні із спорудою додаткових паралельних трубопроводів. При цьому передбачалося, що конструкція перемичок містить п'ять засувок. Виникає питання, наскільки правомірно використовувати таку перемичку в практичних цілях і чи можна поліпшити її конструкцію. Це питання є предметом розгляду 4-го розділу. Як і раніше, порівняльний аналіз впливу структури мережі на функціональну надійність системи спирається на використанні аналітичного методу АРЗ. Проте для ряду окремих випадків структури мережі використання даного методу не можливе через неоднозначний перехід від графа АРЗ до розрахункової моделі функціональної надійності. Авторами пропонується модифікований аналітичний метод розрахунку функціональної надійності системи на основі використання концепції пуассонівських потоків відмови, яка припускає, що в системі одночасно дві й більше відмов наступити не можуть. Метод дозволяє оцінити функціональну надійність системи і тим точніше, чим вище технічна надійність протяжних елементів системи – паралельних трубопроводів. Так, для паралельних трубопроводів з технічною надійністю, що дорівнює 0.9, відхилення розрахункової функціональної надійності системи від дійсної складає не більше 0.01, тобто не більше 1%.

#### 4.1. Типи перемичок в магістральних трубопровідних транспортних системах

Конструкція перемички включає п'ять ділянок, які на рис. 4.1 позначені цифрами від 1 до 5. На рисунку зображено два насосних агрегати, що створюють тиск для транспортування ЦП. Відміна нової схеми магістральної системи на рис. 4.1 від схеми на рис. 3.8 пояснюється тим, що з погляду надійності й реомонтопристосованості в будь-якій магістральній системі недоцільно мати лише один насосний агрегат. Для забезпечення можливості проведення профілактичних та аварійних робіт потрібно

принаймні два насосних агрегати. З тієї ж метою насосні агрегати комплектують системою засувки. Будемо вважати, що ці засувки та насосні агрегати належать насосній станції і не належать трубопровідній системі. Таке припущення значно спрощує дослідження трубопровідних мереж. Симетричне розташування вхідних і кінцевих засувки у трубопровідній мережі і однаковий вплив засувки на надійність системи відповідно спрощує математичні моделі функціональної надійності мережі.

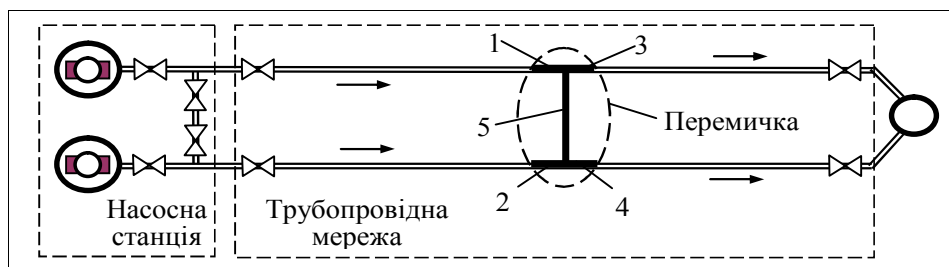


Рис.4.1 – Схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з числом засувки  $n_a = 0$

До складу перемички можуть належати декілька засувки. Якщо на кожній ділянці перемички розташовувати не більше ніж одну засувку, то їх загальна кількість не перевершувати 5. За наявності в конструкції 5 засувки вони розташовуються тільки одним способом, як показано на рис. 3.15. Аналогічна ситуація має місце за відсутністю засувки – існує тільки один варіант конструкції (рис. 4.1).

Якщо число засувки в перемичці знаходиться в діапазоні від 1 до 4, то за законами комбінаторики вони можуть розташовуватися декількома способами.

Нехай на кожній з п'яти ділянок мережі перемички розташовуються не більш ніж за одну засувку. Тоді залежно від числа засувки  $n_a$  число способів визначається числом сполучень  $C_5^{n_a}$  (табл. 4.1). Нижній індекс 5 в числі сполучень  $C_5^{n_a}$  визначає кількість місць для можливого розміщення засувки у перемичці. Два з п'яти місць розташовуються на кінцях трубопроводів, що підводять ЦП до перемички (поз. 1 і 2); два – на трубопроводах, що відводять ЦП від перемички (поз. 3 та 4); одне місце – безпосередньо на перемичці (поз. 5).

На рис. 4.2 перші чотири місця можливого розташування засувки в перемичці позначено чотирикутними зірочками, а п'яте – п'ятикутною зірочкою.

Як випливає з табл. 4.1, існує 32 способи розміщення запірної арматури в перемичці. Забігаючи наперед, відзначимо, що залежно від числа засувки і місць їх розташування ці способи по-різному впливають на зміну функціональної надійності системи: одні – підвищують, другі – зменшують, треті – залишають без зміни.

Таблиця 4.1 – Кількість варіантів влаштування перемички залежно від кількості засувки

Кількість засувки $n_a$	Кількість варіантів устрою перемички $C_5^{n_a}$
0	$C_5^0 = 1$
1	$C_5^1 = 5$
2	$C_5^2 = 10$
3	$C_5^3 = 10$
4	$C_5^4 = 5$
5	$C_5^5 = 1$

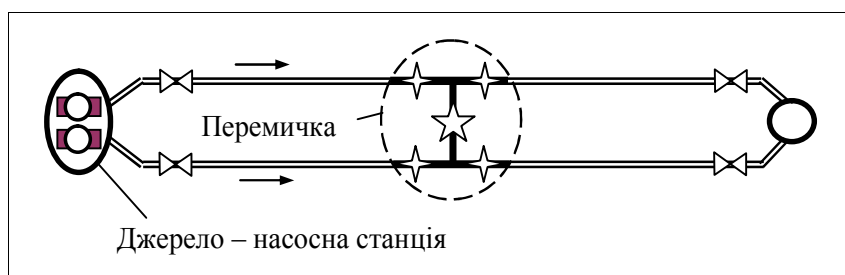


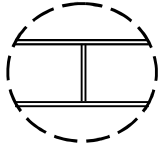
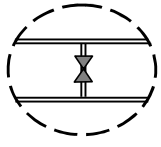
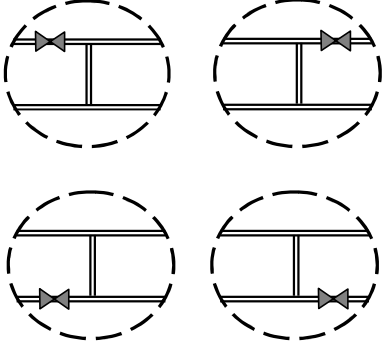
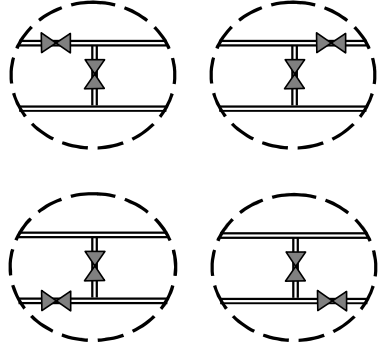
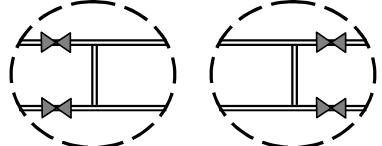
Рис. 4.2 – Схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою

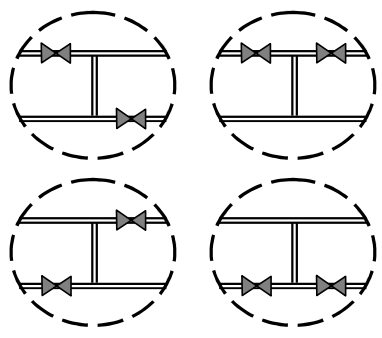
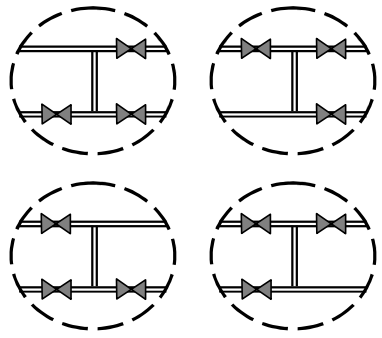
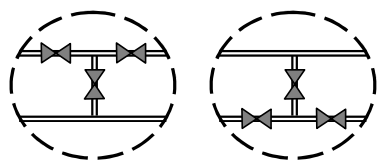
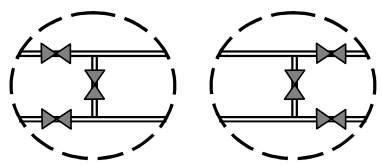
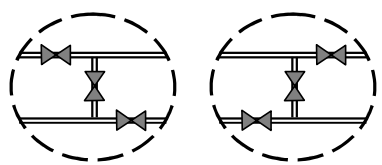
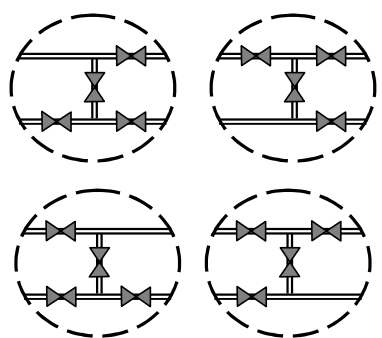
Усі 32 способи розміщення запірної арматури в перемичці за кількістю засувки і ступенем впливу на функціональну надійність магістральної системи можна розбити на 13 типів: *A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M*. Кожен тип відповідає тим способам, що мають рівну загальну кількість засувки в перемичці й рівний ступінь впливу на функціональну надійність системи.

Для повного аналізу впливу конструкції перемички на функціональну надійність системи необхідно дослідити кожен тип перемички. З метою повного обліку типів перемичок і способів розміщення в ній запірної арматури складений відповідний класифікатор (табл. 4.2).

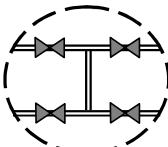
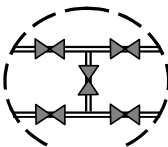


Таблиця 4.2 – Класифікатор перемичок

№ п.п.	Тип перемички	Кількість перемичок	Способи розташування засувки у перемичці	Кількість способів
1	2	3	4	5
1	<i>A</i>	0		1
2	<i>B</i>	1		1
3	<i>C</i>	1		4
4	<i>D</i>	2		4
5	<i>E</i>	2		2

1	2	3	4	5
6	<i>F</i>	2		4
7	<i>G</i>	3		4
8	<i>H</i>	3		2
9	<i>I</i>	3		2
10	<i>J</i>	3		2
11	<i>K</i>	4		4

Закінчення табл. 4.2

1	2	3	4	5
12	<i>L</i>	4		1
13	<i>M</i>	5		1

#### 4.2. Побудова математичної моделі функціональної надійності магістральної трубопровідної системи з однією перемичкою

Як вже відзначалося раніше, функціональна надійність трубопровідної системи, що має у своєму складі перемичку, залежить від типу останньої, тобто від числа засувки і порядку їх розташування в перемичці. Визначення математичної залежності функціональної надійності системи для кожного типу перемички має великий науковий і практичний інтерес.

Основна мета дослідження – отримати математичні моделі функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів для кожного з 13 типів перемичок, що сполучають трубопроводи, залежно від технічної надійності цих трубопроводів. Шукані математичні моделі повинні забезпечувати адекватне розрахункове значення функціональної надійності при відомій технічній надійності кожного з двох паралельних трубопроводів. Такі моделі забезпечать не лише обчислення функціональної надійності конкретної системи двох паралельних трубопроводів, але й дозволять провести порівняльний аналіз ступеня впливу кожного з 13 типів перемички на підвищення або зниження функціональної надійності системи.

Дослідження проводили з використанням методу АРЗ для розрахунку функціональної надійності, який детально поданий в розділі 2. У підрозділі 3.3 вже розглядалася методика побудови математичної моделі функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *M*-типу. Результатом побудови були математичні моделі (3.15), (3.19), (3.20) і (3.22). Аналогічні побудови за тією же методикою були здійснені для перемичок типів *A*, *C*, *D*, *G*, *F*, *L*, *M* (див. Додаток 3).

Результати побудови математичних моделей функціональної надійності трубопровідної мережі зведені в табл. 4.3. У таблиці, як і раніше, величина  $p$  визначає технічну надійність кожного з двох паралельних трубопроводів.

Таблиця 4.3 – Математичні моделі функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з однією перемичкою

№ п.п.	Тип перемички	Кількість засувок	Математична модель функціональної надійності системи
1	2	3	4
1	$A$	0	$P_{2+n0,A}^f = 2p - 1$
2	$B$	1	Неоднозначність моделі
3	$C$	1	$P_{2+n1,C}^f = \frac{1}{2}(3p - 1)$
4	$D$	2	Неоднозначність моделі
5	$E$	2	$P_{2+n2,E}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right] p$
6	$F$	2	$P_{2+n2,F}^f = p$
7	$G$	3	$P_{2+n3,G}^f = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$
8	$H$	3	Неоднозначність моделі
9	$I$	3	Неоднозначність моделі
10	$J$	3	Неоднозначність моделі
11	$K$	4	Неоднозначність моделі
12	$L$	4	$P_{2+n5,L}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2$
13	$M$	5	$P_{2+n5,M}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2$

Всі математичні моделі функціональної надійності в табл. 4.3 отримані в припущенні, що технічна надійність будь-якої засувки в системі дорівнює одиниці.

У табл. 4.3 математичні моделі функціональної надійності системи для перемичок типів *B*, *D*, *H*, *I*, *J* і *K* відсутні. На жаль, використання методу АРЗ на етапі переходу від графа АРЗ до розрахункових моделей функціональної надійності для вказаних типів перемичок приводить до неоднозначних результатів. Причиною неоднозначності є присутність в перемичці центральної засувки, яка ускладнює формування розрахункових моделей функціональної надійності на основі графа АРЗ.

Уникнути неоднозначності, залишаючись в рамках методу АРЗ, не виявляється можливим. Вирішення даної проблеми можливе тільки за умови модифікації методу АРЗ, точніше, модифікації етапу переходу від графа АРЗ до розрахункової моделі функціональної надійності.

#### 4.3. Перший модифікований метод аварійно-ремонтних зон для побудови математичної моделі оцінки функціональної надійності системи

Розглянемо особливості застосування методу АРЗ при спробі побудувати математичну модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *J*-типу з розташуванням засувки, відповідним першому способу (див. табл. 4.2). В цьому випадку система матиме вигляд, показаний на рис. 4.3.

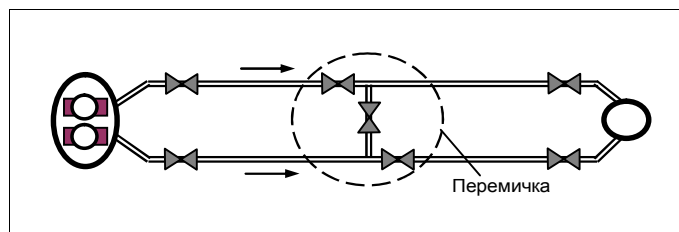


Рис. 4.3 – Схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *J*-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою *J*-типу, зображений на рис. 4.4.

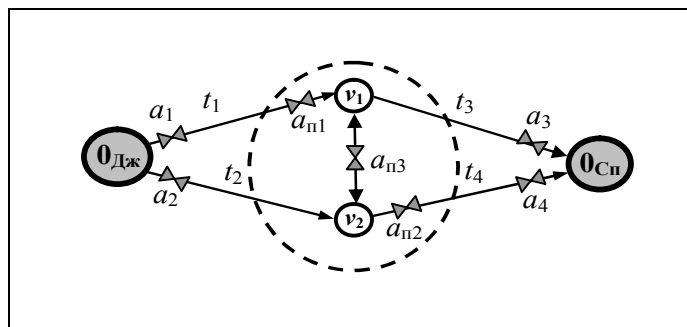


Рис. 4.4 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $J$ -типу

У табл. 4.4 зведені дані, що відображають розбиття системи на аварійно-ремонтні зони (АРЗ) за алгоритмом, викладеним в [55].

Таблиця 4.4 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{Дж},1}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{0_{Дж},2}(t_2), e_{1,2}(t_{п})$ при $z_{1,2} = 1$	$a_2, a_{п2}, a_{п3}$	$v_2$
3	$e_{1,0_{Сп}}(t_3), e_{1,2}(t_{п})$ при $z_{1,2} = 2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{a3}$	$v_1$
4	$e_{3,0_{Сп}}(t_4)$	$a_{п2}, a_{a4}$	—

Нагадаємо, щоб початковий граф системи (рис. 4.4) відповідав вимогам алгоритму розбиття, треба для ребра  $t_{п}$ , що відповідає перемичці, встановити значення вагової функції  $z_{1,2}$  рівним 1 або 2.

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. 4.5.

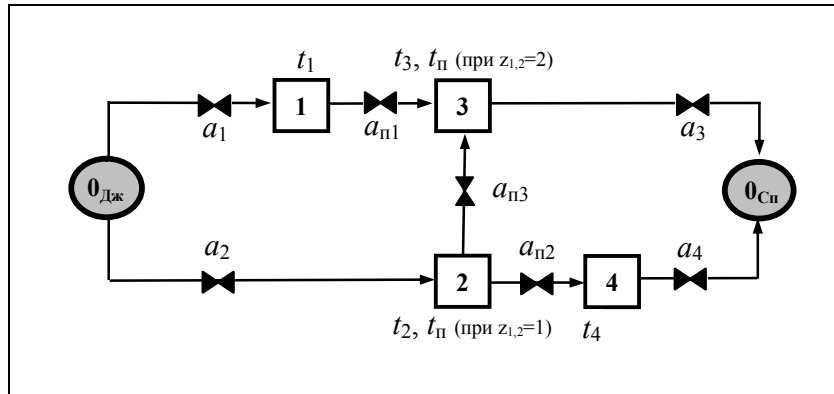


Рис. 4.5 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $J$ -типу

Подальше використання методу АРЗ, стикається з певними труднощам, пов'язаними з неоднозначністю переходу від графа АРЗ до розрахункової моделі надійності. Неоднозначність виникає через мостовий характер засувки  $a_{п3}$ , розташованої в центрі перемички.

Для подолання неоднозначності переходу пропонується модифікувати метод АРЗ. Модифікація методу стосується тільки етапу переходу від графа АРЗ до розрахункової моделі функціональної надійності і полягає в побудові двох моделей функціональної надійності системи з подальшим їх об'єднанням в одну на основі теорем теорії ймовірності «про повну ймовірність» і «про ймовірність протилежних подій». Одна модель будується в припущенні, що центральна засувка, що розташована безпосередньо на трубі перемички, знаходиться в положенні «відкрито», інша модель – в положенні «закрито».

Для побудови моделей введемо наступні позначення:  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пk}$  – технічні надійності засувки, що належить перемичці  $k = \overline{1,3}$ .

Якщо центральна засувка перемички знаходиться в положенні «відкрито», то зони №2 і №3 можна розглядати як єдину зону з сумарною довжиною трубопроводних ділянок рівній довжині кожного з двох паралельних трубопроводів. Тоді частота відмов у такій зоні буде дорівнювати частоті відмов в одному трубопроводі:

$$(1 - p_{2,3}) = (1 - p). \quad (4.1)$$

Тут  $p_{2,3}$  – ймовірність безвідмовної роботи єдиної зони.

3 (4.1) впливає

$$p_{2,3} = p. \quad (4.2)$$

Побудуємо моделі надійності, згідно вимогам модифікації, для графа АРЗ, зображеного на рис. 4.5.

Перша модель (при знаходженні центральної засувки  $a_{п3}$  перемички  $J$ -типу в положенні «відкрито») відповідає схемі на рис. 4.6. Подача ЦП споживачеві не залежить від АРЗ №1 і №4, а також від засувки  $a_1$  і  $a_4$ .

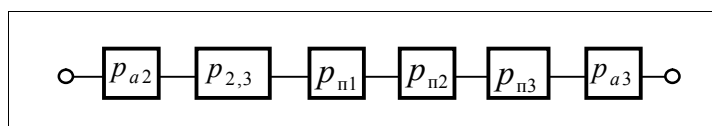


Рис. 4.6 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $J$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито»

Друга модель функціональної надійності системи (при знаходженні засувки  $a_{п3}$  в положенні «закрито») відповідає схемі, зображеній на рис. 4.7.

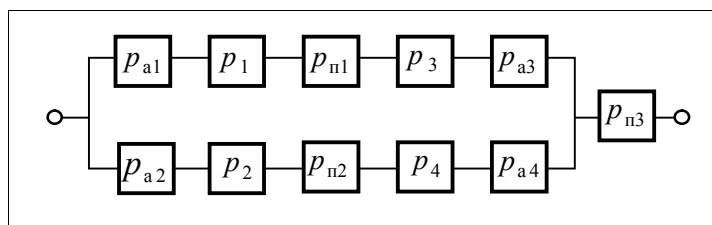


Рис. 4.7 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $J$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито»

Як видно з рис. 4.6 і 4.7, надійність  $p_{п3}$  центральної засувки  $a_{п3}$  утворює послідовну модель надійності з рештою елементів системи. Пояснюється це тим, що вихід з ладу центральної засувки  $a_{п3}$  спричиняє припинення транспортування ЦП споживачеві.



Згідно з розрахунковою схемою (рис. 4.6), функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито» визначається виразом

$$P_{2+п3,J,відкр}^f = p_{a2} p_{2,3} p_{п1} p_{п2} p_{п3} p_{a3}. \quad (4.3)$$

Згідно розрахунковій схемі (рис. 4.7) функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито» визначається виразом:

$$P_{2+п3,J,закр}^f = [1 - (1 - p_{a1} p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_{a2} p_2 p_{п2} p_4 p_{a4})] p_{п3}. \quad (4.4)$$

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{ai} = p_{пj} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$   $j \in \overline{1,3}$ ,

З урахуванням (4.2) і зроблених зауважень вирази (4.3) і (4.4) набувають відповідно вигляду:

$$P_{2+п3,J,відкр}^f = p_a^5 p; \quad (4.5)$$

$$P_{2+п3,J,закр}^f = p_a [1 - (1 - p_1 p_3 p_a^3)(1 - p_2 p_4 p_a^3)]. \quad (4.6)$$

Початкова імовірність безвідмовної роботи кожної із зон №1, №2, №3 та №4 при знаходженні центральної засувки в положенні «закрити» визначається, згідно з формулою (3.24), таким чином:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (4.7)$$

Підставляючи (4.7) в (4.6), отримуємо:

$$P_{2+п3,J,закр}^f = p_a \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right]^2 \right\}. \quad (4.8)$$

Якщо вважати технічну надійність всіх засувки абсолютною, тобто  $p_a = 1$ , то маємо дві спрощені математичні моделі функціональної надійності для системи, схема якої зображена на рис. 4.3:

– для засувки  $a_{п3}$  в положенні «відкрито», згідно із схемою моделі на рис. 4.6:

$$P_{2+п3,J,відкр}^f = p; \quad (4.9)$$

– для засувки  $a_{п3}$  в положенні «закрито», згідно із схемою моделі на рис. 4.7:

$$P_{2+п3,J,закр}^f = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (4.10)$$

Щоб об'єднати моделі (4.9) і (4.10), необхідно додатково мати апіорну імовірність (відносний час) знаходження центральної засувки  $a_{п3}$  в положеннях «відкрито»  $p_{п3,відкр}$ . За наявності такої імовірності  $p_{п3,відкр}$  шукана функціональна надійність системи, згідно з теоремами теорії імовірності «про повну імовірність» і «про імовірність протилежних подій», набуде вигляду

$$P_{2+п3,J}^f = p_{п3,відкр} P_{2+п3,J,відкр}^f + (1 - p_{п3,відкр}) P_{2+п3,J,закр}^f.$$

За відсутністю апіорної інформації про стани центральної засувки (наприклад, при проектуванні нових мереж) ймовірність  $p_{п3,відкр}$  слід прийняти рівною  $\frac{1}{2}$ . Тоді об'єднана математична модель відповідатиме виразу

$$P_{2+п3,J}^f = \frac{1}{2} P_{2+п3,J,відкр}^f + \frac{1}{2} P_{2+п3,J,закр}^f. \quad (4.11)$$

Підставляючи в (4.11) замість  $P_{2+п3,J,откр}^f$  і  $P_{2+п3,J,закр}^f$  їх вирази згідно з (4.9) і (4.10), отримаємо єдину спрощену математичну модель функціональної надійності системи:

$$P_{2+п3,J}^f = \frac{1}{2} p + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \right\}. \quad (4.12)$$

Запропонована модифікація методу АРЗ дозволяє отримати моделі функціональної надійності для системи двох трубопроводів, сполучених засувкою будь-якого типу.

Оскільки на практиці відносний час знаходження центральної засувки перемички в одному з двох положень («відкрито» чи «закрито») є домінуючим, то дійсна функціональна надійність відрізнятиметься від (4.12). По суті, в запропонованій модифікації методу АРЗ величини  $P_{2+п3,J,відкр}^f$  і  $P_{2+п3,J,закр}^f$  визначають можливий діапазон, в якому знаходиться дійсне значення функціональної надійності.

У практичній діяльності для виключення ризику доцільно за функціональну надійність системи брати нижню границю діапазону, тобто для перемички  $J$ -типу

$$P_{2+п3,J}^f \geq \min\{P_{2+п3,J,відкр}^f, P_{2+п3,J,закр}^f\} = p.$$

З іншого боку, розумно встановлювати таке положення центральної засувки, при якому забезпечується більша функціональна надійність системи. Тоді для перемички  $J$ -типу

$$P_{2+п3,J}^f \leq \max\{P_{2+п3,J,відкр}^f, P_{2+п3,J,закр}^f\} = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2}\right)^2\right]^2.$$

У подальшому дослідженні для виключення будь-якої неоднозначності або помилкового тлумачення будемо при визначенні функціональної надійності системи модифікованим методом АРЗ враховувати весь можливий діапазон значень

$$\min\{P_{2+пл,тип,відкр}^f, P_{2+пл,тип,закр}^f\} \leq P_{2+пл,тип}^f \leq \max\{P_{2+пл,тип,відкр}^f, P_{2+пл,тип,закр}^f\}. \quad (4.13)$$

Так, для систем з перемичкою  $J$ -типу шуканий діапазон відповідає подвійній нерівності

$$p \leq P_{2+п3,J}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2}\right)^2\right]^2. \quad (4.14)$$

Отримання розрахункових діапазонів функціональної надійності системи для перемичок типу  $B$ ,  $D$ ,  $H$ ,  $I$ ,  $K$  і  $M$  детально описано в Додатку Д. Результати побудови розрахункових діапазонів вказаних типів перемичок зведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Математичні моделі для оцінки функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з однією перемичкою

№	Тип перемички	Кількість засувов	Математична модель для оцінки функціональної надійності системи
1	$B$	1	$2p - 1 \leq P_{2+n1,B}^f \leq 1 - (1 - p)^2$
2	$D$	2	$\frac{3p - 1}{2} \leq P_{2+n2,D}^f \leq 1 - (1 - p) \left[ 1 - \left( \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right]$
3	$H$	3	$p \leq P_{2+n3,H}^f \leq p + (1 - p) \left( \frac{1 + p}{2} \right)^2$
4	$I$	3	$p \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right] \leq P_{2+n3,I}^f \leq 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right]^2$
5	$J$	3	$p \leq P_{2+n3,J}^f \leq 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right]^2$
6	$K$	4	$\left( \frac{1 + p}{2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right] \leq P_{2+n4,K}^f \leq 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right]^2$
7	$M$	5	$1 - \left[ 1 - \left( \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right]^2 \leq P_{2+n5,M}^f \leq \left[ 1 - \left( \frac{1 - p}{2} \right)^2 \right]^2$

#### 4.4. Другий модифікований метод аварійно-ремонтних зон для побудови математичної моделі функціональної надійності системи

Побудова математичних моделей оцінки функціональної надійності системи у вигляді (4.13) за допомогою першого модифікованого методу АРЗ має ряд суттєвих недоліків, а саме:

- апріорна імовірність знаходження центральної засувки перемички в положенні «відкрито» може бути визначена тільки статистичними методами;
- апріорна імовірність знаходження центральної засувки перемички в положенні «відкрито» для різних трубопровідних систем має різні значення;
- для знов проєктованих систем апріорна імовірність знаходження центральної засувки перемички в положенні «відкрито» невідома;
- імовірність знаходження центральної засувки перемички в положенні «відкрито» може змінювати своє значення у процесі експлуатації системи за довільним законом.

Через вказані недоліки запропонована перша модифікація методу АРЗ дозволяє визначати тільки нижню і верхню границі діапазону, в якому знаходиться дійсне значення функціональної надійності системи. Використовувати діапазон у практичних цілях малоефективно, оскільки він дає тільки *оцінку* функціональної надійності.

Безумовно, для всіх суб'єктів системи трубопровідного постачання бажано мати точнішу оцінку функціональної надійності. Чим вужче діапазон визначення функціональної надійності системи, тим точніша оцінка. Авторами пропонується друга модифікація методу АРЗ на основі концепції пуассонівських потоків відмови, яка забезпечує точнішу оцінку функціональної надійності.

Як відомо, однією з особливостей пуассоновського потоку відмов є твердження про те, що одночасно більше за одну відмову в системі відбутися не може. Це твердження є передумовою для розробки нового (другого) модифікованого методу АРЗ.

Розглянемо теоретичні основи другого модифікованого методу АРЗ з паралельною ілюстрацією його використання на конкретному прикладі. За приклад візьмемо побудову математичної моделі функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *D*-типу, тобто на прикладі отримання формули для розрахунку функціональної надійності  $P_{2+n2,D}^f$ . Даний тип об'єднує чотири способи розміщення засувки в перемичці (див. табл. 4.2). Скористаємося

першим варіантом конструкції перемички. Тоді система матиме вигляд, зображений на рис. 4.8

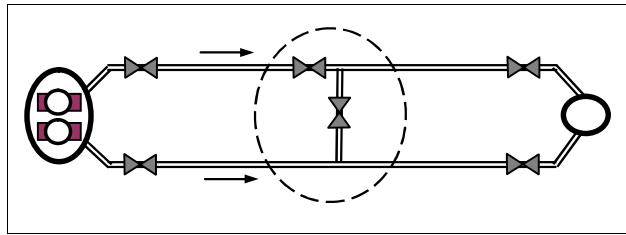


Рис. 4.8 – Схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *D*-типу

Другий модифікований метод АРЗ, як і перший, складається з тих самих етапів, що й метод АРЗ. Нагадаємо ці етапи:

1. Формування математичної моделі трубопровідної транспортної мережі у вигляді зваженого графа.
2. Розбиття початкового зваженого графа трубопровідної транспортної мережі на підграфи, кожен з яких відповідає одній АРЗ.
3. Розрахунок технічної надійності кожної АРЗ.
4. Перетворення початкового зваженого графа мережі в зважений макрограф АРЗ (заміна кожної АРЗ однією вершиною).
5. Побудова розрахункових моделей функціональної надійності магістральної мережі.
6. Аналіз розрахункової моделі з метою виявлення і видалення з неї несуттєвих зв'язків між аварійно-ремонтними зонами, а також самих зон, що не впливають на функціональну надійність.
7. Побудова математичної моделі функціональної надійності мережі за допомогою класичних методів розрахунку надійності технічних систем.

Другий модифікований метод АРЗ припускає виконання перших чотирьох етапів методу АРЗ без будь-яких змін і додавань. Так, для системи на рис. 4.8 результатами виконання вказаних етапів є:

- початковий граф системи (рис. 4.9);
- таблиця розбиття елементів системи на аварійно-ремонтні зони (табл. 4.6);
- граф АРЗ системи (рис. 4.10).

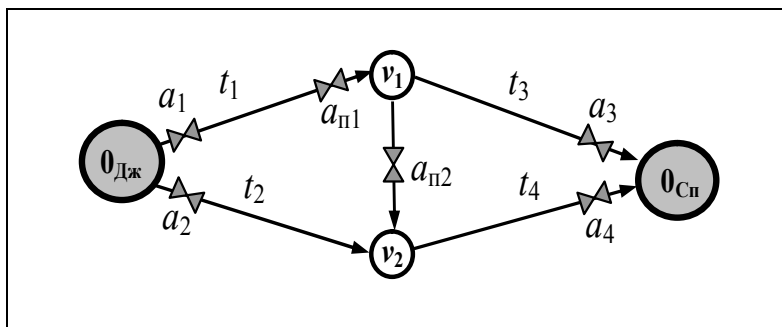


Рис. 4.9 – Початковий граф для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *D*-типу

Таблиця 4.6 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{Дж},1}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{0_{Дж},2}(t_2), e_{3,0_{Сп}}(t_4)$ $e_{1,2}(t_{п})$ при $z_{1,2} = 1$	$a_2, a_{п2}, a_4$	$v_2$
3	$e_{1,0_{Сп}}(t_3), e_{1,2}(t_{п})$ при $z_{1,2} = 2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_3$	$v_1$

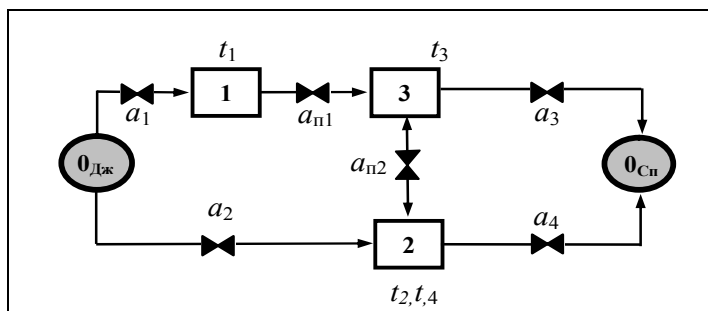


Рис. 4.10 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *D*-типу

Друга модифікація методу АРЗ полягає в кардинальній зміні 5-го й 7-го етапів.

На 5-му етапі висувуються гіпотези, що складають повну групу несумісних подій. Число гіпотез повинне бути на одиницю більше числа

аварійно-ремонтних зон з трубопроводами ненульової довжини. Для системи в умовах прикладу слід висунути такі гіпотези:

- гіпотеза  $H_1$ , що полягає в появі відмови в трубопроводі з АРЗ №1;
- гіпотеза  $H_2$ , що полягає в появі відмови в трубопроводі з АРЗ №2;
- гіпотеза  $H_3$ , що полягає в появі відмови в трубопроводі з АРЗ №3;
- гіпотеза  $H_4$ , що полягає в працездатності всієї мережі.

Інші гіпотези не розглядаються, тому що за умовами пуассонівських потоків одночасно більше за одну відмову в системі не відбувається.

Далі визначають імовірність висунутих гіпотез  $P(H_i)$ , де  $i = \overline{1, k-1}$ ,  $k$  – загальна кількість гіпотез. В умовах прикладу  $k = 4$ .

Ймовірність останньої гіпотези  $P(H_k)$  визначається за допомогою відомої технічної надійності  $p$  кожного з двох паралельних трубопроводів системи. Оскільки ймовірність відмови для кожного трубопроводу дорівнює величині  $(1-p)$ , то ймовірність відмови в двох паралельних трубопроводах буде в 2 рази більше, тобто  $2(1-p)$ . Звідси ймовірність безвідмовної роботи всієї системи (гіпотеза  $H_k$ ) становить  $1 - 2(1-p)$ , або

$$P(H_k) = 2p - 1. \quad (4.15)$$

Вираз (4.15) справедливий для будь-якого типу перемички в системі з двох паралельних трубопроводів при пуассонівському характері відмов в системі.

Гіпотеза  $H_k$  і сума гіпотез  $\sum_{i=1}^{k-1} H_i$  є протилежними подіями, для яких

$$P(H_k) + P\left(\sum_{i=1}^{k-1} H_i\right) = 1.$$

Оскільки всі висунуті гіпотези є несумісними, то

$$P\left(\sum_{i=1}^{k-1} H_i\right) = P(H_1) + P(H_2) + \dots + P(H_{k-1}) = 1 - P(H_k),$$

або

$$P(H_1) + P(H_2) + \dots + P(H_{k-1}) = 2(1-p). \quad (4.16)$$

Вираз (4.16) також справедливий для будь-якого типу перемичок. При цьому сумарна ймовірність гіпотез  $2(1-p)$  розподіляється між



гіпотезами  $H_1, H_2, \dots, H_{k-1}$  пропорційно довжинам трубопровідних частин відповідних АРЗ.

В умовах прикладу вираз (4.15) набуває вигляду

$$P(H_1) + P(H_2) + P(H_3) = 2(1 - p). \quad (4.17)$$

Оскільки довжини трубопровідних частин для АРЗ-1, АРЗ-2 і АРЗ-3 співвідносяться, як  $1:2:1$ , то ймовірність відповідних гіпотез  $P(H_1), P(H_2), P(H_3)$  співвідноситься таким же чином:

$$P(H_1) : P(H_2) : P(H_3) = 1 : 2 : 1. \quad (4.18)$$

Співвідношення (4.17) і (4.18) дозволяє визначити апіорну ймовірність решти гіпотез:

$$P(H_1) = \frac{1}{4}[2(1 - p)] = \frac{1}{2}(1 - p); \quad (4.19)$$

$$P(H_2) = \frac{1}{2}[2(1 - p)] = 1 - p; \quad (4.20)$$

$$P(H_3) = \frac{1}{4}[2(1 - p)] = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (4.21)$$

Далі визначають умовні ймовірності безвідмовної роботи системи  $P(A/H_i)$ , тобто ймовірності роботи системи за умови здійснення гіпотез  $H_i$ ,  $i = 1, k-1$ . Тут  $A$  – подія, яка полягає в безперебійному постачанні цільового продукту споживачеві, тобто в працездатності системи.

Природно, умовна ймовірність останньої гіпотези визначається рівністю

$$P(A/H_k) = 1, \quad (4.22)$$

яка справедлива для всіх типів перемичок.

Умовна ймовірність  $P(A/H_i)$  для решти гіпотез ( $i = \overline{1, k-1}$ ) визначається за допомогою методу АРЗ стосовно даної системи з відсіченою  $i$ -ю АРЗ. Практично це здійснюється шляхом побудови згідно з графом АРЗ розрахункових схем функціональної надійності, за умови, що

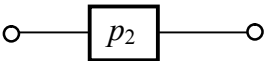

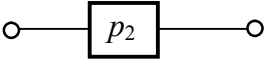
всі суттєві засувки  $i$ -ї АРЗ знаходяться в положенні «закрито» (умова відсікання зони).

В умовах прикладу розрахункова схема й відповідна математична модель умовної імовірності події  $A$  для кожної з гіпотез  $H_1$ ,  $H_2$  і  $H_3$  при абсолютній надійності всіх засувок представлені в табл. 4.7.

У таблиці технічні надійності АРЗ визначають за методикою визначення технічної надійності трубопровідних ділянок системи, яка використовувалася для отримання виразів (3.16) і (4.5). В умовах даного прикладу дана методика приводить до наступних результатів:

$$p_1 = p_3 = \frac{1+p}{2}; \quad p_2 = p.$$

Таблиця 4.7 – Умовна надійність трубопровідної мережі

Гіпотеза	Відсічена зона	Розрахункова схема	Умовна імовірність
$H_1$	АРЗ №1		$P(A/H_1) = p$
$H_2$	АРЗ №2		$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2}\right)^2$
$H_3$	АРЗ №3		$P(A/H_3) = p$

Умовна імовірність  $P(A/H_i)$  в табл. 4.7 можна трактувати як:

- надійність мережі без  $i$ -ї АРЗ;
- імовірність безвідмовної роботи системи без  $i$ -ї АРЗ;
- імовірність постачання цільовій продукції споживачеві системою без  $i$ -ї АРЗ за розрахунковий період часу.

На останньому етапі другого модифікованого методу на підставі теореми «про повну імовірність» будують шукану математичну модель функціональної надійності системи (незалежно від типу перемички):

$$P_{2+\Pi}^{f*} = P(A) = \sum_{i=1}^k P(H_i) P(A/H_i). \quad (4.23)$$

Тут верхній індекс «зірочка» означає, що математична модель функціональної надійності отримана на основі концепції пуассонівських потоків відмов.

Оскільки всі необхідні дані, які фігурують в (4.23), для системи з перемичкою  $D$ -типу отримані, то шукана математична модель функціональної надійності для цієї системи набуває вигляду

$$P_{2+n2,D}^{f*} = P(A) = \sum_{i=1}^4 P(H_i) P(A/H_i) = \\ = \frac{1}{2}(1-p)p + (1-p)\left(\frac{1+p}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}(1-p)p + (2p-1).$$

Після спрощення останнього виразу остаточно маємо

$$P_{2+n2,D}^{f*} = \frac{13p - 5p^2 - p^3 - 3}{4}. \quad (4.24)$$

За викладеним методом були синтезовані математичні моделі надійності для систем двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичками решти типів. Основні результати синтезу наведені в табл. 4.8.

Розробка другого модифікованого методу АРЗ – міра вимушена: базовий метод АРЗ не дозволяє отримати однозначну математичну модель функціональної надійності, а перший модифікований метод практично не реалізовується із-за складності визначення імовірності знаходження центральної засувки перемички в стані «відкрито».

Результати, що отримані за допомогою другого модифікованого методу АРЗ, відповідають заниженій оцінці функціональної надійності системи. Пояснюється це тим, що система гіпотез в методі базується на концепції пуассонівських потоків відмов і не враховує можливості одночасного виникнення відмов в двох і більше АРЗ, точніше за одночасне проведення аварійно-ремонтних робіт по усуненню двох і більше відмов. Якщо такий облік провести, то імовірність гіпотези  $H_k$  (у системі немає відмов), для якої умовна імовірність безвідмовної роботи  $P(A/H_k)=1$ , автоматично збільшиться: число відмов залишається тим самим, а сумарний час перебування в непрацездатному стані скорочується за рахунок взаємного перекриття часових періодів проведення аварійно-ремонтних робіт.

Таблиця 4.8 – Результати побудови математичних моделей функціональної надійності за другим модифікованим методом АРЗ

Тип перемички	Гіпотеза	Ймовірність гіпотези	Умовна ймовірність	Функціональна надійність системи
1	2	3	4	5
$A$	$H_1$	$P(H_1) = 2(1 - p)$	$P(A / H_1) = 0$	$P_{2+n0,A}^{f*} = 2p - 1$
	$H_2$	$P(H_2) = 2p - 1$	$P(A / H_2) = 1$	
$B$	$H_1$	$P(H_1) = 1 - p$	$P(A / H_1) = p$	$P_{2+n1,B}^{f*} = 4p - 2p^2 - 1$
	$H_2$	$P(H_2) = 1 - p$	$P(A / H_2) = p$	
	$H_3$	$P(H_3) = 2p - 1$	$P(A / H_3) = 1$	
$C$	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1 - p)$	$P(A / H_1) = 1 - \frac{3}{2}(1 - p)$	$P_{2+n1,C}^{f*} = \frac{12p - 3p^2 - 5}{4}$
	$H_2$	$P(H_1) = \frac{3}{2}(1 - p)$	$P(A / H_2) = 0$	
	$H_3$	$P(H_3) = 2p - 1$	$P(A / H_3) = 1$	

Продовження табл. 4.8

1	2	3	4	5
$D$	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = p$	$P_{2+n2,D}^{f*} = \frac{13p - 5p^2 - p^3 - 3}{4}$
	$H_2$	$P(H_2) = 1-p$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2}\right)^2$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = p$	
	$H_4$	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	
$E$	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2}p$	$P_{2+n2,E}^{f*} = \frac{5p - p^3 - 2}{2}$
	$H_2$	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2}p$	
	$H_3$	$P(H_3) = 1-p$	$P(A/H_3) = 0$	
	$H_4$	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	
$F$	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = p$	$P_{2+n2,F}^{f*} = 3p - p^2 - 1$
	$H_2$	$P(H_2) = 1-p$	$P(A/H_2) = 0$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = p$	
	$H_4$	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	

Продовження табл. 4.8

1	2	3	4	5
<i>G</i>	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = 0$	$P_{2+n3,G}^{f*} = \frac{38p - 8p^2 - 6p^3 + p^4 - 9}{16}$
	$H_2$	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_4$	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_5$	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	
<i>H</i>	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = p$	$P_{2+n3,H}^{f*} = \frac{13p - 5p^2 - p^3 - 3}{4}$
	$H_2$	$P(H_2) = 1 - p$	$P(A/H_2) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = p$	
	$H_4$	$P(H_4) = 2p - 1$	$P(A/H_4) = 1$	
<i>I</i>	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	$P_{2+n3,I}^{f*} = \frac{5p - p^2 - p^3 - 1}{2}$
	$H_2$	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_4$	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_5$	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	

Продовження табл. 4.8

1	2	3	4	5
<i>J</i>	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	$P_{2+\Pi 3, J}^{f*} = \frac{20p - 6p^2 - 4p^3 + p^4 - 3}{8}$
	$H_2$	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_4$	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \frac{1+p}{2}$	
	$H_5$	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	
<i>K</i>	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	$P_{2+\Pi 4, K}^{f*} = \frac{20p - 6p^2 - 4p^3 + p^4 - 3}{8}$
	$H_2$	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \frac{1+p}{2}$	
	$H_4$	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left( \frac{1+p}{2} \right)^2$	
	$H_5$	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	
<i>L</i>	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	$P_{2+\Pi 4, L}^{f*} = \frac{10p - 4p^2 - 2p^3 + p^4 - 1}{4}$
	$H_2$	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_4$	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_5$	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	

Закінчення табл. 4.8

1	2	3	4	5
$M$	$H_1$	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	$P_{2+n5,M}^{f*} = \frac{10p - 4p^2 - 2p^3 + p^4 - 1}{4}$
	$H_2$	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_3$	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_4$	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \frac{1+p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	$H_5$	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	



Таким чином, використання другого модифікованого методу АРЗ доцільно тільки в тих випадках, коли решта методів не працює або не дозволяє отримати очевидну розрахункову модель функціональної надійності системи. До того ж, завжди слід враховувати, що результатом другого модифікованого методу є занижена оцінка функціональної надійності.

Перевагою другого модифікованого методу в порівнянні з першим є отримання точнішого результату: нижня оцінки функціональної надійності за другим методом вища, ніж за першим. Крім того, якщо початкова надійність трубопроводів прагне до одиниці, то розрахункове значення функціональної надійності за другим методом прагне до дійсного значення.

#### 4.5. Порівняльний аналіз практичної корисності перемичок за критерієм функціональної надійності

Інформаційною базою для порівняльного аналізу практичної корисності перемичок різного типу є чотири таблиці: табл. 4.9; 4.10, 4.11 і 4.12.

Перша табл. 4.9 містить розрахункові значення функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з додатковими засувками, не сполучених перемичкою. У таблиці наводяться два варіанти обчислення функціональної надійності: один – методом АРЗ на основі теорії надійності технічних систем; інший (помічений символом «\*») – другим модифікованим методом АРЗ на основі концепції пуассонівських потоків відмов, згідно з яким більше за одну відмову одночасно в системі відбутися не може.

Таблиця 4.9 – Функціональна надійність системи двох паралельних трубопроводів з двома додатковими засувками

Метод розрахунку	Функціональна надійність системи		
	при $p = 0,7$	при $p = 0,8$	при $p = 0,9$
Метод АРЗ, $P_{2+2д}^f$	0,923	0,9639	0,9905
2-й модифікований метод АРЗ, $P_{2+2д}^{f*}$	0,8335	0,924	0,9805

Перший варіант розрахунку за умови, що всі засувки мають абсолютну надійність, дає точні значення функціональної надійності системи, другий – тільки оцінку (занижену).

Розрахунки за обома методами проводилися в робочому діапазоні технічної надійності  $p$  кожного з двох паралельних трубопроводів: 0,7; 0,8 і 0,9. При цьому функціональна надійність системи  $P_{2+2д}^f$  розраховувалася за формулою (3.11), а функціональна надійність  $P_{2+2д}^{f*}$  згідно з математичного моделлю функціональної надійності системи, отриманої другим модифікованим методом АРЗ:

$$P_{2+2д}^{f*} = \sum_{i=1}^5 P(H_i) P(A/H_i) = \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2}\right)^2 + \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2}\right)^2 + \\ + \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2}\right)^2 + \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2}\right)^2 + \frac{5p - p^2 - p^3 - 1}{2}. \quad (4.25)$$

Призначення першої таблиці – надати для порівняльного аналізу базові дані з функціональної надійності системи, які надалі служитимуть критерієм практичної корисності для кожного типу перемички.

Табл. 4.10 містить розрахункові значення функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою конкретного типу, які отримані методом АРЗ для тих же значень технічної надійності  $p$  кожного з двох паралельних трубопроводів, що фігурують в табл. 4.9.

Таблиця 4.10 – Практична корисність перемичок за критерієм функціональної надійності за версією метода АРЗ

№	Тип перемички	Розрахункова величина	Розрахункові значення $P_{2+пн, тти}^f(p)$			Доцільність практичного використання
			$p = 0,7$	$p = 0,8$	$p = 0,9$	
1	2	3	4	5	6	7
1	A	$P_{2+п0,A}^f$	0,4	0,6	0,8	Протипоказано $P_{2+п0,A}^f < P_2^f$
2	C	$P_{2+п1,C}^f$	0,55	0,7	0,85	Протипоказано $P_{2+п1,C}^f < P_2^f$
3	E	$P_{2+п2,E}^f$	0,6842	0,805	0,8978	Протипоказано $P_{2+п2,E}^f < P_2^f$
4	F	$P_{2+п2,F}^f$	0,7	0,8	0,9	Протипоказано $P_{2+п2,F}^f < P_2^f$

Закінчення табл. 4.10

1	2	3	4	5	6	7
5	$G$	$P_{2+n3,G}^f$	0,8309	0,891	0,9476	Протипоказано $P_{2+n3,G}^f < P_2^f$
6	$L$	$P_{2+n4,L}^f$	0,9555	0,9801	0,995	Доцільно $P_{2+n4,L}^f > P_2^f$ приблизно на 1,87%
7	$M$	$P_{2+n5,M}^f$	0,9555	0,9801	0,995	Доцільно $P_{2+n5,M}^f > P_2^f$ приблизно на 1,87%

У табл. 4.10 зведені розрахункові дані, що отримані згідно математичним моделям, поданим в табл. 4.3. Ці дані визначають функціональну надійність мережі з перемичками лише семи типів:  $A$ ,  $C$ ,  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $L$  і  $M$ .

Третя табл. 4.11 містить розрахункові діапазони значень функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, що отримані за допомогою першого модифікованого методу AP3 для тих же значень технічної надійності  $p$  паралельних трубопроводів, які фігурують в табл. 4.9 і 4.10.

Таблиця 4.11 – Практична корисність перемичок за критерієм функціональної надійності за версією 1-го модифікованого методу AP3

№	Тип перемички	Розрахункова величина	Розрахункові значення $P_{2+n, \text{тти}}^f(p)$			Доцільність практичного використання
			$p = 0,7$	$p = 0,8$	$p = 0,9$	
1	2	3	4	5	6	7
1	$B$	$P_{2+n1,B}^f$	0,4 ÷ 0,91	0,6 ÷ 0,96	0,8 ÷ 0,99	Протипоказано $P_{2+n1,B}^f < P_2^f$
2	$D$	$P_{2+n2,D}^f$	0,55 ÷ 0,9168	0,7 ÷ 0,962	0,85 ÷ 0,9902	Протипоказано $P_{2+n2,D}^f < P_2^f$
3	$H$	$P_{2+n2,H}^f$	0,7 ÷ 0,9168	0,8 ÷ 0,962	0,9 ÷ 0,9902	Протипоказано $P_{2+n2,H}^f < P_2^f$

Закінчення табл. 4.11

1	2	3	4	5	6	7
4	$I$	$P_{2+п3,I}^f$	$0,6461 \div 0,923$	$0,7711 \div 0,9639$	$0,8914 \div 0,9905$	Недоцільно $P_{2+п3,I}^f \leq P_2^f$
5	$J$	$P_{2+п3,J}^f$	$0,7 \div 0,923$	$0,8 \div 0,9639$	$0,9 \div 0,9905$	Недоцільно $P_{2+п3,J}^f \leq P_2^f$
6	$K$	$P_{2+п4,K}^f$	$0,7845 \div 0,923$	$0,8675 \div 0,9639$	$0,941 \div 0,9905$	Недоцільно $P_{2+п4,K}^f \leq P_2^f$
7	$M$	$P_{2+п5,M}^f$	$0,923 \div 0,9975$	$0,964 \div 0,99$	$0,9905 \div 0,9975$	Доцільно $P_{2+п5,M}^f \geq P_2^f$

Розрахункові діапазони в табл. 4.11 відповідають математичним моделям, наведеним в табл. 4.5. Це діапазони значень функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою типу  $B, D, H, I, J, K$  або  $M$ .

Табл. 4.12 містить розрахункові значення оцінки функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з однією перемичкою, які отримані другим модифікованим методом АРЗ, тобто відповідно до математичних моделей, що подані в табл. 4.8, а також всі можливі типи перемичок, що говорить про універсальність методу.

Таблиця 4.12 – Практична корисність перемичок за критерієм функціональної надійності за версією другого модифікованого методу АРЗ

№	Тип перемички	Розрахункова величина	Розрахункові значення $P_{2+пn, тип}^{f*}(p)$			Доцільність практичного використання
			$p = 0,7$	$p = 0,8$	$p = 0,9$	
1	2	3	4	5	6	7
1	$A$	$P_{2+п0,A}^{f*}$	0,4	0,6	0,8	Протипоказано $P_{2+п0,A}^{f*} < P_2^{f*}$
2	$B$	$P_{2+п1,B}^{f*}$	0,82	0,92	0,98	Протипоказано $P_{2+п1,B}^{f*} < P_2^{f*}$
3	$C$	$P_{2+п1,C}^{f*}$	0,4425	0,635	0,8212	Протипоказано $P_{2+п1,C}^{f*} < P_2^{f*}$

Закінчення табл. 4.12

1	2	3	4	5	6	7
4	$D$	$P_{2+n1,D}^{f*}$	0,8268	0,922	0,9802	Протипоказано $P_{2+n1,D}^{f*} < P_2^{f*}$
5	$E$	$P_{2+n2,E}^{f*}$	0,5785	0,744	0,8855	Протипоказано $P_{2+n2,E}^{f*} < P_2^{f*}$
6	$F$	$P_{2+n2,F}^{f*}$	0,61	0,76	0,89	Протипоказано $P_{2+n2,F}^{f*} < P_2^{f*}$
7	$G$	$P_{2+n3,G}^{f*}$	0,7414	0,8511	0,9376	Протипоказано $P_{2+n3,G}^{f*} < P_2^{f*}$
8	$H$	$P_{2+n3,H}^{f*}$	0,8268	0,922	0,9802	Протипоказано $P_{2+n3,H}^{f*} < P_2^{f*}$
9	$I$	$P_{2+n3,I}^{f*}$	0,8335	0,924	0,9805	Неефективно $P_{2+n3,I}^{f*} = P_2^{f*}$
10	$J$	$P_{2+n3,J}^{f*}$	0,866	0,9402	0,985	Малоефективно $P_{2+n3,J}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизно на 2,04%
11	$K$	$P_{2+n4,K}^{f*}$	0,866	0,9402	0,985	Малоефективно $P_{2+n4,K}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизно на 2,04%
12	$L$	$P_{2+n4,L}^{f*}$	0,8985	0,9564	0,9895	Доцільно $P_{2+n4,L}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизно на 4,08%
13	$M$	$P_{2+n5,M}^{f*}$	0,8985	0,9564	0,9895	Доцільно $P_{2+n5,M}^{f*} < P_2^{f*}$ приблизно на 4,08%

Всі три табл. 4.10, 4.11 і 4.12 містять в останніх колонках результати порівняльного аналізу. Відзначимо, що при аналізі впливу перемичок різного типу на функціональну надійність треба значення функціональної надійності  $P_{2+nл, тип}^f(p)$  в табл. 4.10 і 4.11 порівнювати із значеннями базовою функціональною надійністю  $P_2^f$  в табл. 4.9, а значення  $P_{2+nл, тип}^{f*}(p)$  в табл. 4.12 – із значеннями в табл. 4.9.

У табл. 4.13 зведені результати аналізу практичної доцільності використання перемичок різного типу як засобу підвищення

функціональної надійності системи. В основі аналізу покладено три розрахункові методи:

- метод АРЗ;
- перший модифікований метод АРЗ;
- другий модифікований метод АРЗ.

Як видно з табл. 4.13, результати аналізу не є суперечливими. Це свідчить перш за все про правомірність використання першого і другого модифікованих методів АРЗ для оцінки функціональної надійності магістральних трубопровідних мереж.

Таблиця 4.13 – Заключна порівняльна таблиця практичної корисності перемичок

№ п.п.	Тип перемички	Доцільність практичного використання за критерієм функціональної надійності		
		Метод АРЗ	1-й модиф. метод АРЗ	2-й модиф. метод АРЗ
1	2	3	4	5
1	<i>A</i>	Протипоказано	–	Протипоказано
2	<i>B</i>	–	Протипоказано	Протипоказано
3	<i>C</i>	Протипоказано	–	Протипоказано
4	<i>D</i>	–	Протипоказано	Протипоказано
5	<i>E</i>	Протипоказано	–	Протипоказано
6	<i>F</i>	Протипоказано	–	Протипоказано
7	<i>G</i>	Протипоказано	–	Протипоказано
8	<i>H</i>	–	Протипоказано	Протипоказано
9	<i>I</i>	–	Неефективно	Неефективно
10	<i>J</i>	–	Неефективно	Малоефективно
11	<i>K</i>	–	Неефективно	Малоефективно
12	<i>L</i>	Доцільно	–	Доцільно
13	<i>M</i>	Доцільно	Доцільно	Доцільно

Порівняльний аналіз табл. 4.10, 4.11 і 4.12 з 4.9 показав, що 8 з 13 типів переминок, а саме: *A, B, C, D, E, F, G* і *H*, знижують функціональну надійність системи. Тому їх використання в практичних цілях протипоказано.

Використання перемика *I*-типу не сприяє підвищенню функціональної надійності системи навіть за умови абсолютної технічної надійності самої перемика. Оскільки реальна ймовірність безвідмовної роботи перемика менше одиниці, то загальна функціональна надійність системи трохи падає. Тому у будь-якому випадку використання перемика *I*-типу недоцільне.

Перемики типу *N, J* і *P* спричиняють незначний вплив на зміну функціональній надійності системи – приблизне збільшення на  $1 \div 2\%$  (табл. 4.10 і 4.12). Оскільки зміна функціональної надійності не є найбільшою з можливих, то перемики даних типів не викликають особливого практичного інтересу.

Перемики типу *R* і *S* в порівнянні з перемиками решти типів роблять максимальний вплив на функціональну надійність – приблизне збільшення  $2 \div 4\%$  (табл. 4.10 і 4.12). Перемики даних типів найбільш переважні для практичного використання. Тому надалі їм приділятиметься підвищена увага.

Дані всіх чотирьох таблиць добре узгоджуються між собою, що є надійним обґрунтуванням правомірності запропонованих модифікацій методу АРЗ і підтвердженням справедливості зроблених висновків.

Невеликі прирости функціональної надійності для переминок типів: *J, K, L* і *M*, в табл. 4.10 і 4.12 можуть ввести в оману. Маленькі прирости пояснюються нелінійною залежністю ймовірності безперервної поставки ЦП конкретному споживачеві (функціональної надійності трубопровідної мережі стосовно споживача) від ймовірності безвідмовної роботи трубопроводу *p*. Таке становище змінюється на краще, якщо замість функціональної надійності розглядати функціональну ненадійність, тобто ймовірність припинення постачання ЦП споживачеві. У цьому разі за критерій оцінки абсолютного впливу типу перемика на функціональну надійність обирають зменшення ймовірності припинення постачання ЦП

$$\Delta P^{f*} = P_{2+2д}^{f*} - P_{2+пл, тип}^{f*} \quad (4.26)$$

У табл. 4.14 наведено дані про вплив переминок зазначеного типу на функціональну ненадійність трубопровідної мережі.

Табл. 4.14 – Вплив типу перемички на зміну функціональної ненадійності системи двох трубопроводів

Тип пере-мички	Розрахункові значення функціональної ненадійності та її абсолютні та відносні зміни відносно початкової ненадійності мережі без перемички									Середнє значення відносного зменшення функціональ-ної ненадійності,
	при $p = 0,7$			при $p = 0,8$			при $p = 0,9$			
	$1 - P_{2+пл, тип}^{f*}$	$\Delta P^{f*}$	$\frac{\Delta P^{f*} 100\%}{1 - P_{2+2д}^{f*}}$	$1 - P_{2+пл, тип}^{f*}$	$\Delta P^{f*}$	$\frac{\Delta P^{f*} 100\%}{1 - P_{2+2д}^{f*}}$	$1 - P_{2+пл, тип}^{f*}$	$\Delta P^{f*}$	$\frac{\Delta P^{f*} 100\%}{1 - P_{2+2д}^{f*}}$	
Без пере-мички, $1 - P_{2+2д}^{f*}$	0,1665	0	0	0,0760	0	0	0,0195	0	0	0
$J$	0,1340	-0,0325	-19,52%	0,0598	-0,0162	-21,32%	0,0150	-0,0045	-23,08	-21,31%
$K$	0,1340	-0,0325	-19,52%	0,0598	-0,0162	-21,32%	0,0150	-0,0045	-23,08	-21,31%
$L$	0,1015	-0,0650	-39,04%	0,0436	-0,0324	-42,63%	0,0105	-0,0094	-48,21	-43,29%
$M$	0,1015	-0,0650	-39,04%	0,0436	-0,0324	-42,63%	0,0105	-0,0094	-48,21	-43,29%

Примітка. Значення для величини  $P_{2+2д}^{f*}$  беруться з табл. 4.9.



#### 4.6. Вплив надійності запірної арматури на функціональну надійність системи

На перший погляд, перемичка  $L$ -типу, що містить в своїй конструкції на одну засувку менше, ніж перемичка  $M$ -типу, більш придатніша до практичного застосування. Проте така думка не зовсім вірна. У кожного типу є свої переваги і недоліки.

Всі моделі функціональної надійності, що наведені в табл. 4.3, 4.5 і 4.8, отримані за умови абсолютної надійності всіх засувок. Тому, якщо термін служби засувки значно перевищує термін експлуатації системи та якщо в процесі експлуатації засувки не вимагають профілактичного обслуговування з припиненням доступу до них цільового продукту, то перемичка  $L$ -типу ефективніша, ніж перемичка  $M$ -типу. В іншому випадку перевага віддається перемичці  $M$ -типу, незважаючи на те, що вона вимагає установку додаткової (центральною) засувки.

Зміна пріоритетів у перемичок типів  $R$  і  $S$  пояснюється таким чином.

Для заміни або ремонту будь-якої засувки в перемичці  $L$ -типу необхідно припинити транспортування цільового продукту від джерела до споживача. Те саме торкається і засувки  $a_1$  і  $a_2$  (рис.4.11).

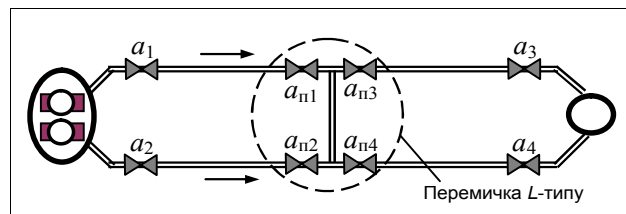


Рис. 4.11 – Схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $L$ -типу

Математична модель функціональної надійності системи з урахуванням технічної надійності засувки (див. рис. 4.12) має вигляд

$$P_{2+п4,K}^f = p_a^4 \left[ 1 - \left( 1 - p_a \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2, \quad (4.27)$$

де  $p_a$  — технічна надійність кожної засувки системи;  $p$  — технічна надійність кожного з двох паралельних трубопроводів.

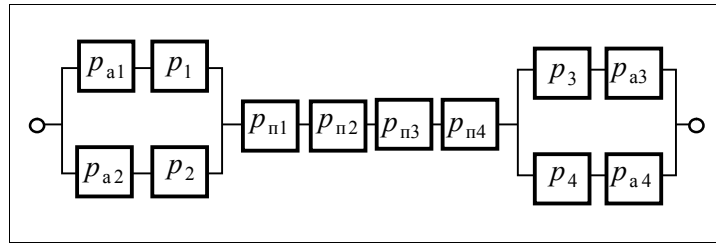


Рис. 4.12 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $L$ -типу.

Для заміни або ремонту будь-якої засувки в перемичці  $M$ -типу, окрім центральної  $a_{п5}$  (рис. 4.13), немає необхідності переривати постачання цільового продукту споживачеві. Тому математична модель функціональної надійності системи в даному випадку (див. рис. 4.14) має вигляд

$$P_{2+п4,M}^f = p_a \left[ 1 - \left( 1 - p_a^2 \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2, \quad (4.28)$$

де  $p_a$  – технічна надійність кожної засувки системи;  $p$  – технічна надійність кожного з двох паралельних трубопроводів.

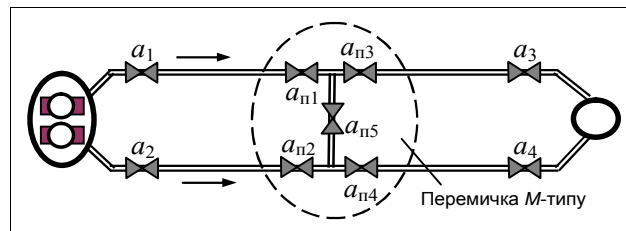


Рис. 4.13 – Схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $M$ -типу

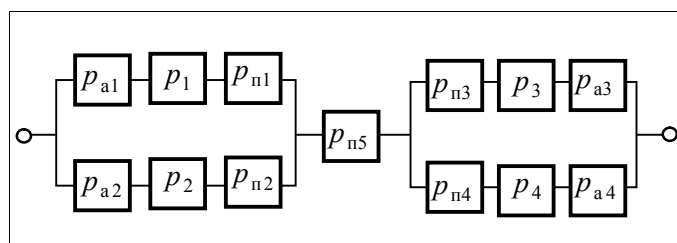


Рис. 4.14 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $M$ -типу

У табл. 4.15 наведено розрахункові значення функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $L$ -типу (2-а колонка) і  $M$ -типу (3-я колонка) залежно від технічної надійності засувки  $p_a$  при технічній надійності кожного з двох паралельних трубопроводів  $p = 0,9$ . Розрахунки здійснювали згідно з математичними моделями (4.27) і (4.28) відповідно для  $L$ -типу і  $M$ -типу перемички,

Таблиця 4.15 – Порівняльна таблиця перемичок типів  $L$  і  $M$  за критерієм функціональної надійності

Технічна надійність засувки $p_a$	Функціональна надійність системи	
	$L$ -типу	$M$ -типу
0,9	0,6288	0,8069
0,95	0,7991	0,9117
0,99	0,9538	0,9806

Порівняльний аналіз практичної корисності перемички за критерієм функціональної надійності системи при неабсолютній технічній надійності засувки ( $p_a < 1$ ) переконливо свідчить на користь перемички  $M$ -типу.

## **РОЗДІЛ 5**

### **АДЕКВАТНІСТЬ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ**

Метод АРЗ дозволяє вирішувати дуже важливе завдання за визначення ймовірності безперервного постачання цільового продукту конкретному споживачеві. Він є основною науковою передумовою для проведення ряду нових досліджень в області трубопровідних систем.

Основні етапи методу були розроблені й зазнали значну модифікацію протягом 2007 – 2009 років. Оскільки метод претендує на домінуючу роль у становленні теорії функціональної надійності трубопровідних систем, а також на широке впровадження в процеси експлуатації, проектування і розвитку трубопровідних систем різного призначення, то він повинен обов'язково пройти перевірку на адекватність.

У подальших двох розділах монографії розглядаються питання організації і проведення обчислювальних експериментів по перевірці адекватності математичних моделей, побудованих за його допомогою.

#### **5.1. Цілі перевірки адекватності та шляху їх досягнення**

Аналітичні методи побудови математичних моделей для розрахунку показників функціональної надійності найбільш ефективні при проектуванні нових систем або існуючих систем з малим періодом експлуатації, коли бази статистичних даних про систему відсутні або мають недостатній об'єм для отримання статистично надійних результатів.

Процес розробки аналітичних методів супроводжується строгим науковим обґрунтуванням з дотриманням всіх принципів теорії надійності технічних систем. Проте, математичні моделі, що генеруються за їх допомогою, повинні бути перевірені на адекватність – дуже велика ціна можливої помилки.

Перевірка адекватності моделей переслідує дві цілі:

- доведення адекватності конкретних моделей;
- доведення адекватності самого методу побудови моделей.

Обидві цілі взаємозв'язані. Доказ адекватності конкретних моделей підтверджує адекватність аналітичного методу і свідчить про безпомилковість проведення багатоетапної процедури побудови даних моделей. Доказ же адекватності методу гарантує його універсальність, тобто підтверджує правомірність його використання для отримання моделі довільної системи. Останнє особливо актуально для складних систем, коли перевірка адекватності моделі є достатньо трудомістким процесом.

Перевірку адекватності доцільно засновувати на статистичних методах, які дозволяють безпосередньо оцінити той або інший показник надійності системи. При цьому перевірка вважається успішною, якщо значення показника, розраховане за аналітичною моделлю, потрапить в довірчий інтервал значень, отриманий методами статистичного аналізу.

Перевірка адекватності аналітичних моделей на основі методів статистичного аналізу для систем з тривалим періодом експлуатації не викликає особливих ускладнень, якщо служби експлуатації зібрили повну інформацію про збої в постачаннях цільового продукту кожному споживачеві системи. Тривіальна статистична обробка зібраних даних дозволяє перевірити адекватність моделі.

Зовсім інакше йде справа з новими або проєктованими системами. В цьому випадку для перевірки адекватності моделей необхідно організувати досить складний обчислювальний експеримент.

Сучасні інформаційні й комп'ютерні технології дозволяють створювати віртуальні системи і здійснювати збір віртуальних даних про поведінку цих систем, ні в чому не поступливих звичайним статистичним даним. Більш того, у віртуальних системах можна управляти масштабом часу і стискати період експлуатації системи до тривалості роботи програми, що реалізує процедуру перевірки адекватності. При цьому реальні періоди експлуатації систем, які вимірюються роками, замінюються віртуальними, які вимірюються секундами.

Скороминучість роботи комп'ютерних програм дозволяє кардинально змінити якість перевірки. Тепер немає необхідності будувати довірчі інтервали для досліджуваного показника, оскільки багаторазове повторення експерименту, згідно закону великих чисел [4], приводить до дійсного значення показника функціональної надійності

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{P}_i^f = P^f \quad (5.1)$$

де  $n$  – чимала кількість експериментів з перевірки адекватності моделі;  $\tilde{P}_i^f$  – випадкове значення показника функціональної надійності при  $i$ -му

експерименті;  $P^f$  – істинне, або адекватне, значення показника функціональної надійності.

Віртуальна перевірка адекватності вимагає додаткових зусиль, пов'язаних з визначенням окремих значень показника функціональної надійності  $\tilde{P}_i^f$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Складність структури трубопровідної мережі та її розмірність (кількісний склад структурних компонентів) учиняють прямий вплив на трудомісткість обчислювального експерименту за визначенням  $\tilde{P}_i^f$ . Чим складніше структура й чим більше розмірність трубопровідної мережі, тим більше трудомісткість проведення обчислювального експерименту. Тому перевірку адекватності аналітичного методу доцільно проводити на моделях простих систем.

З усіх трубопровідних систем, що використовуються в господарській діяльності міст, регіонів і країни в цілому, найбільш відповідними до перевірки адекватності аналітичного методу є магістральні трубопровідні транспортні системи, які вдовж шляху транспортування від джерела до кінцевого пункту не мають проміжних пунктів відбору цільового продукту. Пояснюється це тим, що дані системи мають малу розмірність: одне джерело цільового продукту, один споживач, малу кількість трубопровідних ділянок. Причому всі трубопровідні ділянки є однорідними: мають однаковий діаметр труб, товщину стінок, матеріал виготовлення й досить однакові умови експлуатації і проведення аварійно-ремонтних і профілактичних робіт. Однорідність ділянок дозволяє у програмі перевірки використовувати одну інтенсивність відмов  $\lambda$  і одну інтенсивність відновлення  $\mu$  для всіх трубопроводів. Крім того, структуру магістральних трубопровідних систем можна значно спростити: немає необхідності розглядати всю магістраль – досить обмежитися її фрагментом. Внаслідок спрощення протяжна магістральна система може бути зведена до системи з однією перемичкою. Залежно від типу конструкції перемички [48] існує цілий ряд різних простих структур. Отже маємо й цілий ряд математичних моделей функціональної надійності для перевірки адекватності методу.

Після того, як адекватність методу буде доведена, перевірка адекватності інших конкретних моделей вже буде необов'язковою. Її проведення може бути викликане тільки бажанням переконатися, що при генерації моделі не було допущено помилки. Така перевірка доцільна тільки для систем, що мають стратегічне значення, коли ціна можливої помилки у багато разів перевищує витрати на постановку експерименту.

Перевірка адекватності моделей для систем з різними структурами вимагає проведення окремого обчислювального експерименту. Для систем

з неоднаковими структурами алгоритми, що визначають залежність постачання цільового продукту користувачам від чергової відмови в системі, також є неоднаковими. Автоматична або навіть автоматизована генерація програми, яка реалізує такий інтелектуальний алгоритм для довільної системи, дуже складна.

## **5.2. Особливості обчислювального експерименту для перевірки адекватності математичної моделі**

Обчислювальний експеримент імітує в часі та просторі експлуатацію системи, для якої перевіряється адекватність моделі функціональної надійності. Імітація полягає в організації за допомогою генератора випадкових чисел аварійних ситуацій (відмов) на різних елементах трубопровідної системи протягом розрахункового періоду часу  $T$  і підрахунку відносного часу безперебійного постачання цільового продукту кожному споживачеві системи.

Всі відмови, що виникають в системі протягом періоду часу  $T$ , залежно від структурного елемента трубопровідної мережі будемо поділяти на:

- відмови трубопровідних ділянок;
- відмови запірної арматури (засувки).

У свою чергу, відмови на трубопровідних ділянках залежно від їх інтенсивності виникнення та інтенсивності усунення (інтенсивності відновлення трубопровідної ділянки) поділяються на  $J_1$  груп відповідно до кількості груп однорідних трубопровідних ділянок. Так, для системи на рис. 5.1 кількість груп  $J_1 = 3$ , тому що інтенсивність виникнення відмов приймає три різних значення  $\lambda \in \{0,20 \quad 0,26 \quad 0,40\}$ . При цьому кожному конкретному значенню інтенсивності виникнення відмови відповідає одна й та ж інтенсивність відновлення  $\mu$  (або 0,01, або 0,007, або 0,003).

Основний критерій, що характеризує приналежність відмови до певної групи – це рівний проміжок часу між моментом виникнення відмови до моменту її усунення.

Для трубопровідних мереж з простою структурою  $J_1 = 1$ , тобто всі відмови виводять з ладу аварійну ділянку на однаковий період часу.

## **5.3. Визначення параметрів відмов трубопровідних ділянок**

Кількість відмов на трубопровідних ділянках, що належать одній групі, визначають за формулою

$$n_g = \text{int} \left( \lambda_g \sum_{i=1}^{Card \ E} l(t_i) Q_i + 0,5 \right), \quad g = \overline{1, J_1} \quad (5.2)$$

де  $g$  – індекс (номер) однорідної групи відмов;  $\text{int}(\cdot)$  – функція взяття цілої частини числа;  $\lambda_g$  – інтенсивність виникнення відмов для  $g$ -ї групи;  $J_1$  – кількість груп однорідних ділянок;  $\sum_{i=1}^{Card \ E} l(t_i) Q_i = l_g$  – загальна протяжність трубопроводів  $g$ -ї групи. Тут  $Card \ E$  – загальне число трубопровідних ділянок, або потужність множини ребер у математичній моделі трубопровідної мережі;  $l(t_i)$  – довжина  $i$ -ї трубопровідної ділянки мережі;  $Q_i$  – цілочислова змінна, що дорівнює 0, якщо ділянка  $t_i$  не входить до  $g$ -ї групи, і дорівнює 1, якщо входить. Константа 0,5 у виразі (5.2) використовується для перетворення функції  $\text{int}(\cdot)$  у функцію округлення до найближчого цілого числа. Так, в умовах прикладу на рис. 5.1:

– для 1-ї групи відмов на трубопровідних ділянках

$$\begin{aligned} n_1 &= \text{int} \left( \lambda_1 \sum_{i=1}^{Card \ E} l(t_i) Q_i + 0,5 \right) = \text{int} \{ 0,20 \cdot [l(t_1) + l(t_2)] + 0,5 \} = \\ &= \text{int} [0,20 \cdot (18 + 17) + 0,5] = \text{int} [7,5] = 7; \end{aligned}$$

– для 2-ї групи відмов на трубопровідних ділянках

$$\begin{aligned} n_2 &= \text{int} \left( \lambda_2 \sum_{i=1}^{Card \ E} l(t_i) Q_i + 0,5 \right) = \\ &= \text{int} \{ 0,26 \cdot [l(t_3) + l(t_4) + l(t_5) + l(t_7) + l(t_9) + l(t_{11}) + l(t_{13}) + l(t_{15}) + l(t_{17})] + 0,5 \} = \\ &= \text{int} [0,26 \cdot (7 + 8 + 4 + 2 + 1 + 0,7 + 2 + 0,2 + 1) + 0,5] = \text{int} (7,234) = 7; \end{aligned}$$

– для 3-ї групи відмов на трубопровідних ділянках

$$\begin{aligned} n_3 &= \text{int} \left( \lambda_3 \sum_{i=1}^{Card \ E} l(t_i) Q_i + 0,5 \right) = \\ &= \text{int} \{ 0,40 \cdot [l(t_6) + l(t_8) + l(t_{10}) + l(t_{12}) + l(t_{14}) + l(t_{16}) + l(t_{18}) + l(t_{19})] + 0,5 \} = \\ &= \text{int} [0,40 \cdot (4,4 + 0,4 + 0,7 + 0,4 + 0,5 + 0,5 + 0,9 + 0,2) + 0,5] = \text{int} (3,7) = 3. \end{aligned}$$

*Примітка.* Присутність операції округлення негативно позначається на процесі доказу адекватності методу. Тому при доказі (і лише доказі) адекватності методу слід підбирати трубопровідні системи так, щоб



операції округлення були відсутні. В умовах прикладу округлення відсутнє лише для 1-ї групи відмов:  $n_1 = 0,20(18 + 17) = 7$ .

Кожна  $k$ -а відмова в системі на трубопровідній ділянці ( $k = \overline{1, n_\Sigma}$ , де  $n_\Sigma = \sum_{g=1}^{J_1} n_g$  – сумарне число відмов на трубопровідних ділянках, в умовах прикладу  $n_\Sigma = 7 + 7 + 3 = 17$ ) характеризується трьома параметрами:

- місцем виникнення відмови (випадковий індекс  $\tilde{i}$  трубопровідної ділянки, на якій відбулася відмова);
- випадковим часом появи відмови  $\tilde{t}_k$  (значення на вісі часу в інтервалі від 0 до величини  $T$ );
- часом усунення відмови  $\tau_k$ .

Для визначення параметра «місце виникнення відмови» на трубопровідних ділянках для кожної однорідної групи ділянок будуюмо координатну лінію, на якій послідовно відзначаємо початок і кінець кожної ділянки. Початок першої ділянки має координату 0. Кінець останньої ділянки має координату, що дорівнює сумарній довжині всіх ділянок групи. Кінець кожної попередньої ділянки є початком наступної. Для кожної ділянки вказуємо відповідне значення індексу  $i$ .

На рис. 5.1,а показана координатна лінія для 1-ї групи, на рис. 5.1,б – для 2-ї групи; на рис. 5.1,в – для 3-ї групи.

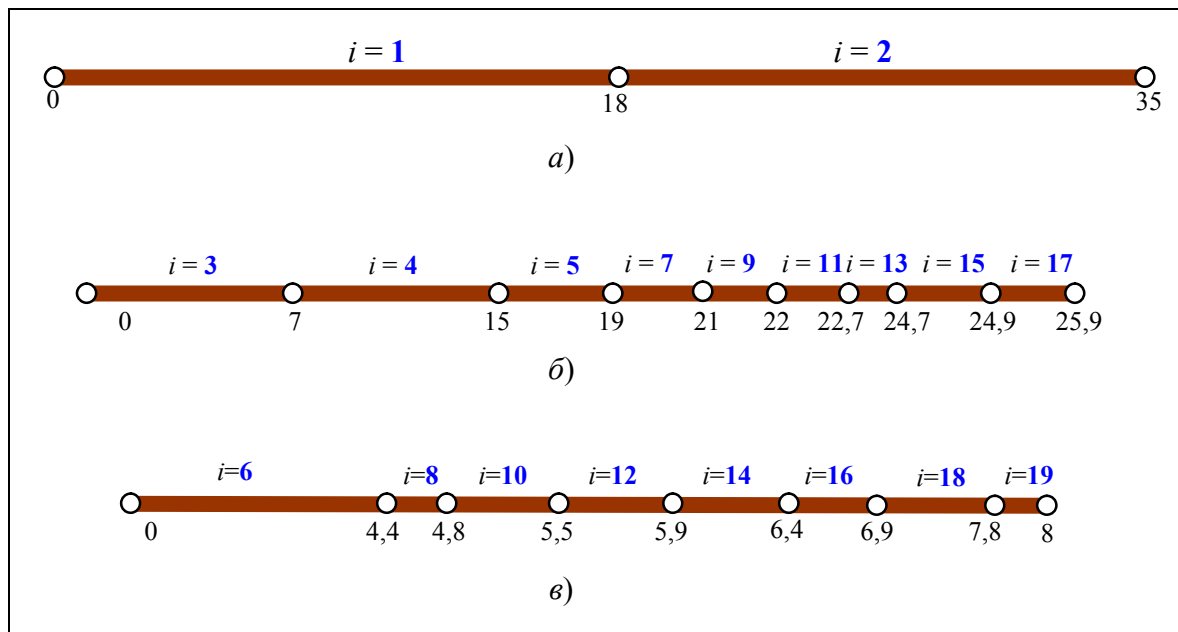


Рис. 5.1 – Координатні лінії для однорідних груп трубопровідних ділянок

Якщо кількість трубопроводних ділянок у групі більше одиниці, як це має місце в умовах прикладу, то для визначення індексу трубопроводу попередньо формують двовимірний масив  $\mathbf{G}^g$  з індексами трубопроводів і відповідними координатами кінця ділянки на координатній лінії, де  $g$  – номер групи. Так, для 1-ї групи масив містить елементи, наведені в табл. 5.1. Безпосередні елементи масиву в таблиці виділені подвійною рамкою. Елементи 1-го рядка ( $r=1$ ) масиву можуть бути не впорядковані за збільшенням, а елементи 2-го рядка ( $r=2$ ) обов'язково повинні бути впорядковані за збільшенням.

Таблиця 5.1 – Елементи масиву  $\mathbf{G}^1$ 

$r \backslash j$	1	2
1	<b>1</b>	<b>2</b>
2	<b>18</b>	<b>35</b>

Перша група відмов містить 7 відмов ( $n_1 = 7$ ). Конкретне значення параметра «місце виникнення відмови» для кожної  $k$ -ї ( $k = \overline{1, 7}$ ) відмови першої групи визначається за допомогою рекурсивної функції

$$f_k^1(j, x) = \begin{cases} g_{1j}^1, & \text{якщо } x < g_{2j}^1; \\ f_k^1(j+1, x), & \text{якщо } x \geq g_{2j}^1, \end{cases} \quad (5.3)$$

де  $j, x$  – параметри рекурсивної функції;  $g_{1j}^1, g_{2j}^1$  – елементи масиву  $\mathbf{G}^1$ .

При кожному зверненні до функції (5.3) її цілочисловий параметр  $j$  завжди рівний 1, а параметр  $x$  є дійсне число, що визначається за формулою

$$x = l_1 \cdot \tilde{x}. \quad (5.4)$$

Тут  $l_1$  – протяжність всіх трубопроводів 1-ої групи ( $l_1 = 35$ );  $\tilde{x}$  – випадкова величина, яку отримують внаслідок звернення до генератора випадкових чисел, що рівномірно розподілені в інтервалі від 0 до 1.

Конкретне значення параметра «місце виникнення відмови» для кожної з 7-и відмов 2-ї групи ( $n_2 = 7$ ) і з 3-х відмов 3-ї групи ( $n_3 = 3$ )

визначається аналогічним чином, тобто будують відповідні масиви  $\mathbf{G}^2$  (табл. 5.2) і  $\mathbf{G}^3$  (табл. 5.3).

Таблиця 5.2 – Елементи масиву  $\mathbf{G}^2$ 

$r \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3	4	5	7	9	11	13	15	17
2	7	15	19	21	22	22,7	24,7	24,9	25,9

Конкретне значення параметра «місце виникнення» відмови для кожної  $k$ -ї ( $k=8, 14$ ) відмови 2-ї групи визначають за допомогою рекурсивної функції

$$f_k^2(j, x) = \begin{cases} g_{1j}^2, & \text{якщо } x < g_{2j}^2; \\ f_k^2(j+1, x), & \text{якщо } x \geq g_{2j}^2, \end{cases} \quad (5.5)$$

де  $j, x$  – параметри рекурсивної функції;  $g_{1j}^2, g_{2j}^2$  – елементи масиву  $\mathbf{G}^2$ .

При кожному зверненні до функції (5.5) її цілочисловий параметр  $j$  завжди рівний 1, а параметр  $x$  є дійсне число, що визначається за формулою

$$x = l_2 \cdot \tilde{x}. \quad (5.6)$$

Тут  $l_2$  – протяжність усіх трубопроводів 2-ої групи ( $l_2 = 25,9$ );  $\tilde{x}$  – випадкова величина, що отримують внаслідок звернення до генератора випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1.

Таблиця 5.3 – Елементи масиву  $\mathbf{G}^3$ 

$r \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6	8	10	12	14	16	18	19
2	4,4	4,8	5,5	5,9	6,1	6,9	7,8	8

Конкретне значення параметра «місце виникнення» відмови для кожної  $k$ -ї відмови 3-ої групи ( $k = \overline{15, 17}$ ) визначається за допомогою рекурсивної функції

$$f_k^3(j, x) = \begin{cases} g_{1j}^3, & \text{якщо } x < g_{2j}^3; \\ f_k^3(j+1, x), & \text{якщо } x \geq g_{2j}^3. \end{cases} \quad (5.7)$$

де  $j, x$  – параметри рекурсивної функції;  $g_{1j}^3, g_{2j}^3$  – елементи масиву  $G^3$ .

При кожному зверненні до функції (5.7) її цілочисловий параметр  $j$  завжди рівний 1, а параметр  $x$  є дійсне число, що визначається за формулою

$$x = l_3 \cdot \tilde{x}. \quad (5.8)$$

Тут  $l_3$  – протяжність усіх трубопроводів 3-ї групи ( $l_3 = 8$ );  $\tilde{x}$  – випадкова величина, яку отримують внаслідок звернення до генератора випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1.

Для всіх відмов на трубопровідних ділянках формується двовимірний масив  $M^{T1}$ , прообразом якого в умовах прикладу служить табл. 5.4. Безпосередні елементи масиву в таблиці виділені подвійною рамкою.

Таблиця 5.4 – Значення параметрів відмов трубопроводів (масив  $M^{T1}$ )

Індекс парам. $r$	Параметр	Індекс відмови $k$								
		1	...	7	8	...	14	15	...	17
1	Індекс місця	$f_1^1$	...	$f_7^1$	$f_8^2$	...	$f_{14}^2$	$f_{15}^3$	...	$f_{17}^3$
2	Час появи	$\tilde{t}_1$	...	$\tilde{t}_7$	$\tilde{t}_8$	...	$\tilde{t}_{14}$	$\tilde{t}_{15}$	...	$\tilde{t}_{17}$
3	Час усунення	$\tau_1$	...	$\tau_7$	$\tau_8$	...	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	...	$\tau_{17}$

Перший рядок масиву ( $r=1$ ) заповнюється за результатами визначення «місця виникнення відмови». Для першої групи відмов ( $k=1,7$ )

даний параметр розраховують за формулою (5.3); для 2-ї групи ( $k = \overline{3,11}$ ) – за формулою (5.5); для 3-ї групи ( $k = \overline{15,17}$ ) – за формулою (5.7).

Другий рядок ( $r = 2$ ) містить випадковим чином заданий час появи відмови. Дані для другого рядка формуються внаслідок послідовного звернення до генератора випадкових чисел з рівномірним розподілом від 0 до 1 за формулою

$$\tilde{t}_k = \text{int}(365 \cdot \tilde{x}), \quad k = \overline{1, n_\Sigma} \quad (5.9)$$

де  $\tilde{x}$  – випадкова величина, яку отримують внаслідок звернення до генератора випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1;  $n_\Sigma = \sum_{g=1}^{J_1} n_g$  – сумарне число відмов на трубопровідних ділянках в системі (в умовах прикладу  $n_\Sigma = 17$ );  $\text{int}(\cdot)$  – оператор узяття цілої частини числа; 365 – коефіцієнт перетворення одиниці вимірювання часу (рік на добу).

Третій рядок масиву ( $r = 3$ ) виходить з другого рядка шляхом збільшення його значень на величину, що дорівнює тривалості усунення  $k$ -ї відмови  $\Delta t_k$  (одиниця виміру – доба):

$$\tau_k = \tilde{t}_k + \Delta t_k = \tilde{t}_k + \frac{365}{\mu_k}. \quad (5.10)$$

Для відмов кожної групи однорідних трубопровідних ділянок інтенсивність відновлення  $\mu_k$  однакова. Так, в умовах прикладу (див. табл. 2.1) для 1-ї групи тривалість усунення відмови  $\Delta t_k = 3,65$  ( $k = \overline{1, 7}$ ); для 2-ї групи –  $\Delta t_k = 2,555$  ( $k = \overline{8, 14}$ ); для 3-ї групи –  $\Delta t_k = 1,095$  ( $k = \overline{15, 17}$ ).

Для організації обчислювального експерименту необхідно знати кількість відмов на трубопровідних ділянках для кожної однорідної групи і параметри кожної відмови.

#### 5.4. Визначення параметрів відмов запірної арматури

Відмови на запірній арматурі залежно від її надійності (відносного часу справного стану протягом періоду  $T$ ) діляться на  $J_2$  груп. Відмови кожної групи мають рівну ймовірність виникнення і рівний час на їх усунення. Для трубопровідних мереж з простою структурою  $J_2 = 1$ .

Для організації обчислювального експерименту необхідно знати кількість відмов запірної арматури для кожної однорідної групи і параметри кожної відмови.

Кількість відмов на суттєвій запірній арматурі в кожній групі визначають за формулою

$$m_h = \text{int} \left( \frac{[1 - p_h] T \sum_{j=1}^{Card A} Q_j}{\Delta t_h} + 0,5 \right), \quad h = \overline{1, J_2} \quad (5.11)$$

де  $h$  – індекс (номер) однорідної групи відмов на запірній арматурі;  $\text{int}(\cdot)$  – функція взяття цілої частини числа;  $p_h$  – ймовірність безвідмовної роботи засувки  $h$ -ї групи;  $T$  – розрахунковий період для надійності системи;  $J_2$  – кількість груп однорідних засувки;  $\sum_{j=1}^{Card A} Q_j = q_h$  – загальна кількість засувки  $h$ -ї групи;  $Card A$  – загальне число суттєвих засувки в мережі;  $\Delta t_h$  – період часу, необхідний для усунення однієї відмови на засувках  $h$ -ї групи;  $Q_j$  – цілочислова змінна, що дорівнює 0, якщо засувка належить  $h$ -й групі, і дорівнює 1 – у протилежному разі.

Для конкретизації даних обчислювального експерименту без втрати спільності доказу для всіх груп засувки приймаємо  $T = 1$  [рік], а  $\Delta t = \frac{1}{365}$  [рік]. Тоді формула (5.11) набуває вигляду

$$m_h = \text{int} \left[ 365 \cdot (1 - p_h) \sum_{j=1}^{Card A} Q_j + 0,5 \right], \quad h = \overline{1, J_2} . \quad (5.12)$$

Так, в умовах прикладу (рис. 2.1):

– для 1-ї групи відмов на запірній арматурі

$$m_1 = \text{int} \left[ 365 \cdot (1 - p_1) \sum_{j=1}^{19} Q_j + 0,5 \right] = \text{int} [365 \cdot (1 - 0,99) \cdot 4 + 0,5] = 15;$$

– для 2-ї групи відмов на запірній арматурі

$$m_2 = \text{int} \left[ 365 \cdot (1 - p_2) \sum_{j=1}^{19} Q_j + 0,5 \right] = \text{int} [365 \cdot (1 - 0,98) \cdot 7 + 0,5] = 51;$$

– для 3-ї групи відмов на запірній арматурі

$$m_3 = \text{int} \left[ 365 \cdot (1 - p_3) \sum_{j=1}^{19} Q_j + 0,5 \right] = \text{int} [365 \cdot (1 - 0,97) \cdot 8 + 0,5] = 88.$$

Кожна  $k$ -а відмова на засувках ( $k = \overline{1, m_\Sigma}$ , де  $m_\Sigma = \sum_{h=1}^{J_2} m_h$  – сумарне число відмов на запірній арматурі, в умовах прикладу  $m_\Sigma = 15 + 51 + 88 = 154$ ) характеризується трьома параметрами:

- місцем виникнення відмови (випадковий індекс  $\tilde{j}$  засувки  $a_j$ , на якій відбулася відмова);
- випадковим часом появи відмови  $\tilde{t}_k$  (значення на вісі часу в інтервалі від 0 до величини  $T$ );
- часом усунення відмови  $\tau_k$ .

Для відмов на запірній арматурі, як це було й для трубопроводів, формується масив  $\mathbf{M}^{31}$ , прообразом якого є табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Значення параметрів відмов запірної арматури (масив  $\mathbf{M}^{31}$ )

Індекс параметра. $r$	Параметр	Індекс відмови $k$								
		1	...	15	16	...	66	67	...	154
1	Індекс місця	$f_1$	...	$f_{15}$	$f_{16}$	...	$f_{66}$	$f_{67}$	...	$f_{154}$
2	Час появи	$\tilde{t}_1$	...	$\tilde{t}_{15}$	$\tilde{t}_{16}$	...	$\tilde{t}_{66}$	$\tilde{t}_{67}$	...	$\tilde{t}_{154}$
3	Час усунення	$\tau_1$	...	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	...	$\tau_{66}$	$\tau_{67}$	...	$\tau_{154}$

Параметр «місце виникнення відмови» на запірній арматурі для кожної групи відмов визначається за нижче приведеною методикою.

Якщо в групі число засувки дорівнює одиниці то індекс місця відмови (параметр «місце виникнення відмови») дорівнює індексу цієї засувки.

Якщо кількість засувки в однорідній групі перевищує одиницю, як це має місце в умовах прикладу для всіх трьох груп, то попередньо для кожної групи створюється одновимірний масив  $\mathbf{H}^h$  з індексами засувки  $a_j$ . Тут  $h$  – індекс групи однорідних засувки ( $h \in \{1, 2, \dots, J_2\}$ ). Так, для 1-ї групи

засувок масив містить елементи, що подані в табл. 5.6, для 2-ї групи – в табл. 5.7, для 3-ї групи – в табл. 5.8. Безпосередньо елементи масивів у таблицях виділені подвійною рамкою. Елементи масивів можуть бути не впорядковані за збільшенням.

Таблиця 5.6 – Елементи масиву  $\mathbf{H}^1$ 

Індекс елемента масиву $j$	1	2	3	4
Значення елемента масиву (індекс засувки $a_j$ )	1	2	4	3

Таблиця 5.7 – Елементи масиву  $\mathbf{H}^2$ 

Індекс елемента масиву $j$	1	2	3	4	5	6	7
Значення елемента масиву (індекс засувки $a_j$ )	5	8	10	9	12	11	13

Таблиця 5.8 – Елементи масиву  $\mathbf{H}^3$ 

Індекс елемента масиву $j$	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення елемента масиву (індекс засувки $a_j$ )	6	7	14	17	15	16	18	19

Конкретне значення параметра «місце виникнення відмови», яке вноситься до табл. 5.5, для кожної з 15-ти відмов 1-ї групи ( $m_1 = 15$ ) визначається як елемент  $h_j^1$  масиву  $\mathbf{H}^1$ . Індекс елемента  $h_j^1$  обчислюють за формулою

$$j = \text{int}(q_1 \tilde{x} + 1), \quad (5.13)$$

де  $q_1$  – кількість засувок в 1-й однорідній групі (в умовах прикладу  $q_1 = 4$ ;  $\tilde{x}$  – випадкова величина, які отримують внаслідок звернення до генератора випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1;  $\text{int}(\cdot)$  – функція взяття цілої частини числа.



Конкретне значення параметра «місце виникнення відмови», яке вноситься до табл. 5.6, для кожної з 51-й відмови 2-ї групи ( $m_2 = 51$ ) визначається як елемент  $h_j^2$  масиву  $\mathbf{H}^2$ . Індекс елемента  $h_j^2$  обчислюється за формулою

$$j = \text{int}(q_2 \tilde{x} + 1), \quad (5.14)$$

де  $q_2$  – кількість засувов в 2-й однорідній групі (в умовах прикладу  $q_2 = 7$ ).

Конкретне значення параметра «місце виникнення відмови» для кожної з 88 відмов 3-ї групи ( $m_3 = 88$ ) визначається аналогічним чином – як елемент  $h_j^3$  масиву  $\mathbf{H}^3$ . Індекс елемента  $h_j^3$  обчислюють за формулою

$$j = \text{int}(q_3 \tilde{x} + 1), \quad (5.15)$$

де  $q_3$  – кількість засувов в 3-й однорідній групі (в умовах прикладу  $q_3 = 8$ ).

Значення параметра «час появи» для всіх відмов на запірній арматурі знаходять за допомогою виразу

$$\tilde{t}_k = \text{int}(365 \cdot \tilde{x}), \quad k = \overline{1, m_\Sigma}, \quad (5.16)$$

де  $\tilde{x}$  – випадкова величина, що отримують внаслідок звернення до генератора випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1;  $m_\Sigma = \sum_{h=1}^{J_2} m_h$  – сумарне число відмов на запірній арматурі в системі (в умовах прикладу  $m_\Sigma = 154$ );  $\text{int}(\cdot)$  – оператор узяття цілої частини числа; 365 – коефіцієнт перетворення одиниці вимірювання часу.

Значення параметра «час усунення» знаходять за формулою

$$\tau_k = \tilde{t}_k + \Delta t, \quad k = \overline{1, m_\Sigma} \quad (5.17)$$

де  $\Delta t$  – прийнята тривалість усунення відмови, що чисельно дорівнює  $\frac{1}{365}$  [год].

### 5.5. Прив'язка відмов трубопроводів до аварійно-ремонтних зон

Для подальшої організації обчислювального експерименту доцільно в масиві  $\mathbf{M}^1$  параметр місця відмови, що визначає індекс трубопроводу в

мережі, перетворити в параметр, що визначає індекс АРЗ, до якого відноситься відповідний трубопровід. Таке перетворення дозволить значно спростити заключну частину обчислювального експерименту без спотворення його суті.

Перетворення здійснюється за допомогою простої процедури заміни індексу трубопроводу індексом АРЗ, до якої відноситься той або інший трубопровід. В умовах прикладу прообразом перетвореного масиву є табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Перетворений масив параметрів відмов трубопроводів (масив  $\mathbf{M}^{n1}$ )

Індекс парам. $r$	Параметр	Індекс відмови $k$								
		1	...	2	3	...	11	12	...	17
1	Індекс АРЗ	$z_1$	...	$z_2$	$z_3$	...	$z_{11}$	$z_{12}$	...	$z_{17}$
2	Час появи	$\tilde{t}_1$	...	$\tilde{t}_2$	$\tilde{t}_3$	...	$\tilde{t}_{11}$	$\tilde{t}_{12}$	...	$\tilde{t}_{17}$
3	Час усунення	$\tau_1$	...	$\tau_2$	$\tau_3$	...	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	...	$\tau_{17}$

У табл. 5.9 параметр  $z_k$  ( $k = \overline{1,17}$ ) в умовах прикладу може приймати одне із значень: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 або 10.

## 5.6. Побудова карт впливу відмов на постачання цільового продукту конкретним споживачам

Обчислювальний експеримент для перевірки адекватності моделі функціональної надійності в умовах прикладу трубопровідної мережі на рис. 2.1 припускає 17 відмов на трубопровідних ділянках і 154 відмов на запірній арматурі.

При виникненні відмов на трубопровідній мережі протягом розрахункового періоду часу  $T$  кожен конкретний споживач в процесі усунення відмов може продовжувати отримувати цільовий продукт або залишатися без такого залежно від типу відмови (на трубопроводі або запірній арматурі) і місця його виникнення (індексу трубопроводу або індексу засувки). У процесі обчислювального експерименту при розрахунку ймовірності постачання цільового продукту кожному конкретному споживачеві необхідно враховувати тільки ті відмови, що впливають на постачання продукту цьому споживачеві. Для усунення

впливу на розрахунок функціональної надійності несуттєвих відмов складають дві карти впливу відмов на постачання цільового продукту конкретним споживачам:

- карта впливу відмов трубопровідних ділянок;
- карта впливу відмов запірної арматури.

Карта впливу відмов трубопровідних ділянок на постачання цільового продукту є двовимірним масивом  $\mathbf{M}^{T2}$ . Перший вимір масиву визначає споживача (індекс  $r$ ), другий – трубопровідну ділянку (індекс  $i$ ). Прообразом такого масиву є табл. 5.10, де  $R$  – кількість споживачів в мережі;  $I$  – кількість АРЗ в мережі.

Таблиця 5.10 – Карта впливу відмов в АРЗ на постачання цільового продукту конкретним споживачам (масив  $\mathbf{M}^{T2}$ )

	1	2	...	$i$	...	$I$
1	$m_{11}$	$m_{12}$	...	$m_{1i}$	...	$m_{1I}$
2	$m_{21}$	$m_{22}$	...	$m_{2i}$	...	$m_{2I}$
...	...	...	...	...	...	...
$r$	$m_{r1}$	$m_{r2}$	...	$m_{ri}$	...	$m_{rI}$
...	...	...	...	...	...	...
$R$	$m_{R1}$	$m_{R2}$	...	$m_{Ri}$	...	$m_{RI}$

Значення елементу  $m_{ri}$  масиву  $\mathbf{M}^{T2}$  визначається залежно від впливу відмови в  $i$ -й АРЗ на постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві, а саме:

$$m_{ri} = \begin{cases} 0, & \text{якщо не впливає;} \\ 1, & \text{якщо перериває постачання;} \\ 2, & \text{якщо залежить від інших АРЗ або засувки.} \end{cases}$$

Для заповнення  $r$ -го рядка масиву  $\mathbf{M}^{T2}$  використовують спрощену схему графа АРЗ стосовно  $r$ -го споживача, яку доповнюють позначеннями трубопровідних ділянок для кожної зони. Так, в умовах прикладу для заповнення першого рядка масиву  $\mathbf{M}^{T2}$  використовують спрощену схему,

що зображена на рис. 5.2; другого рядка – на рис. 5.3; третього – на рис. 5.4; четвертого – на рис. 5.4.

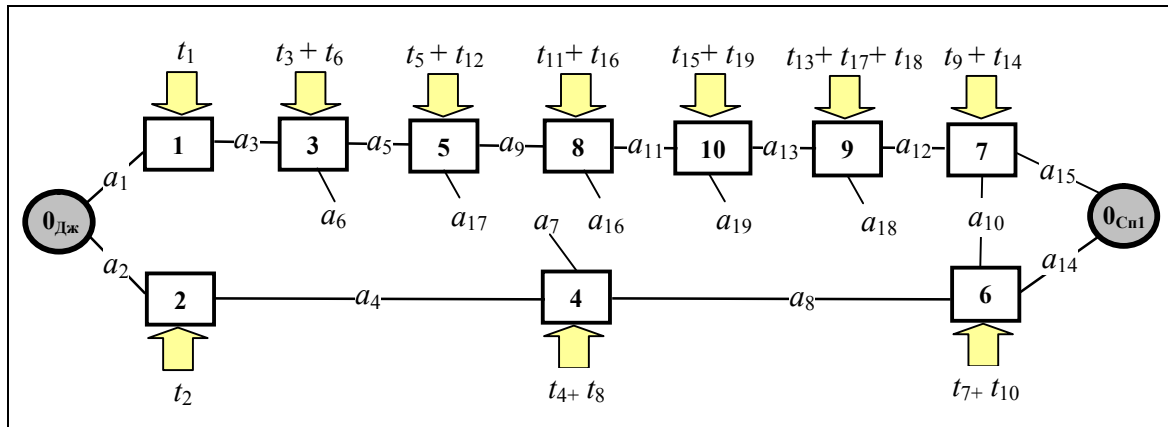


Рис. 5.2 – Спрощений макрограф АРЗ стосовно споживача  $O_{Cn1}$

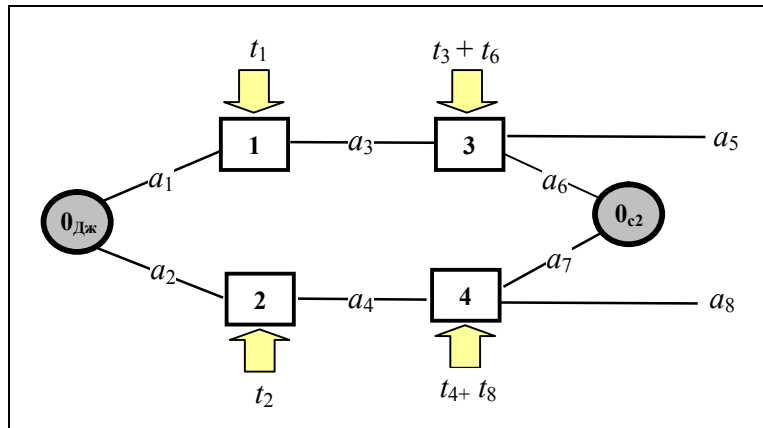


Рис. 5.3 – Спрощений макрограф мережі стосовно споживача  $O_{Cn2}$

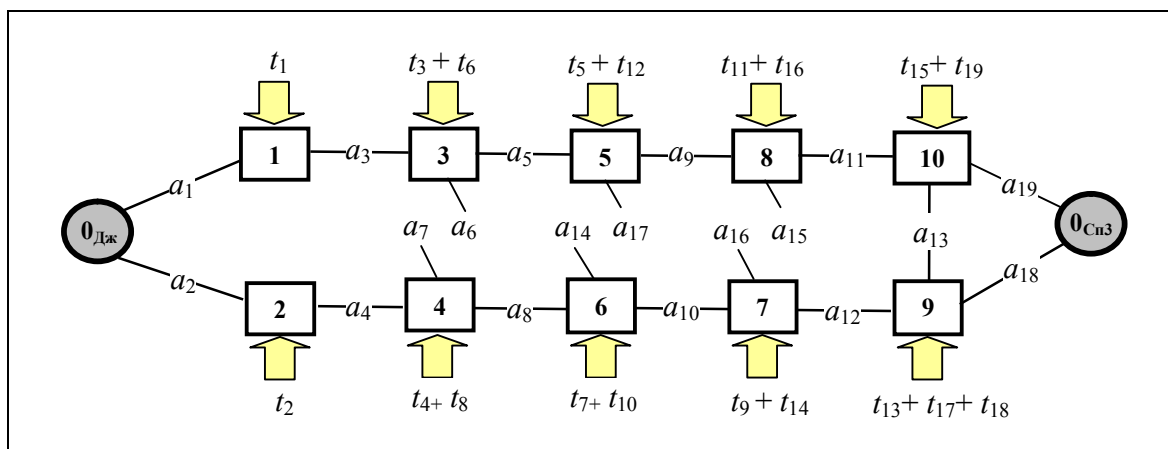
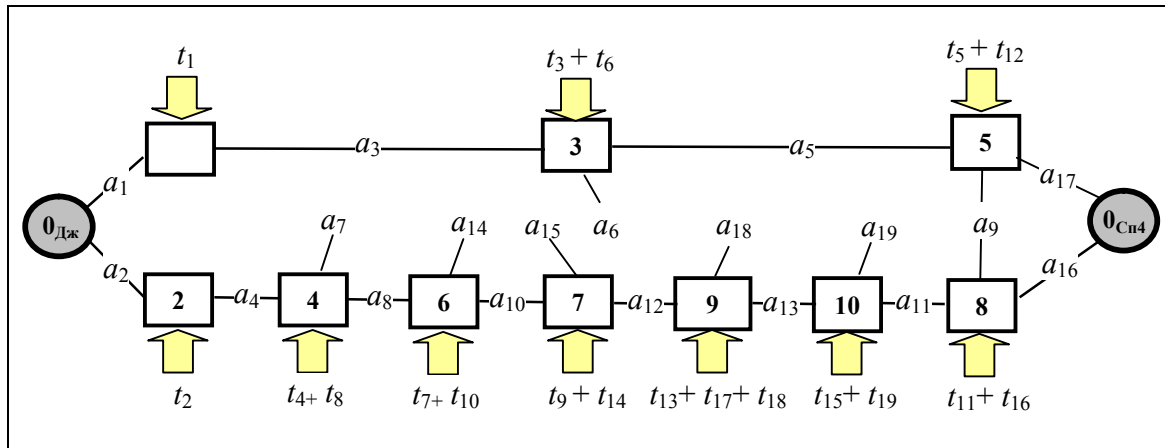


Рис. 5.4 – Спрощений макрограф АРЗ стосовно споживача  $O_{Cn3}$

Рис. 5.5 – Спрощений макрограф АРЗ стосовно споживача  $O_{Cn4}$ 

В умовах прикладу карта впливу відмов в АРЗ на постачання цільового продукту конкретним споживачем відповідає табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Карта впливу відмов в АРЗ на постачання цільового продукту конкретним споживачем (масив  $M^{r2}$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Масив  $M^{r2}$  дозволяє при проведенні обчислювального експерименту виключити з розрахунку функціональної надійності мережі стосовно конкретних споживачів ті відмови трубопроводів, що не впливають на постачання цільового продукту цим споживачем. Виключення здійснюється на основі послідовного аналізу всіх відмов трубопроводів.

Аналіз  $k$ -ї відмови (в умовах прикладу  $k \in \{1, 17\}$ ), здійснюється за правилами:

– якщо елемент  $m_{rj}$  масиву  $M^{r2}$  дорівнює нулю, то відмова відповідного елемента мережі ( $i$ -го трубопроводу) не впливає на постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві. Така відмова не враховується при розрахунку функціональної надійності мережі відносно  $r$ -го споживача;

– якщо елемент  $m_{ri}$  масиву  $\mathbf{M}^{r2}$  дорівнює одиниці, то відмову відповідного елемента мережі має безпосереднє відношення до переривання постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві. Таку відмову обов'язково враховують при розрахунку функціональної надійності мережі стосовно  $r$ -го споживача;

– якщо елемент  $m_{ri}$  масиву  $\mathbf{M}^{r2}$  дорівнює двом, то вплив цієї відмови на постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві залежить від наявності відмов на інших елементах мережі, що забезпечують альтернативні маршрути постачань, а також від часу їх виникнення і часу усунення. За відсутністю перекриття часу усунення  $k$ -ї відмови з часом усунення відмов на інших елементах така відмова також виключається з розрахунку. Елементи мережі, від яких залежить  $k$ -а відмова, для кожного  $r$ -го споживача визначаються з відповідної розрахункової моделі (рис. 5.2 – 5.5 в умовах прикладу). Час виникнення  $\tilde{t}_k$  і час усунення  $\tau_k$   $k$ -ї відмови та всіх наявних відмов інших елементів, від яких залежить  $k$ -а відмова, визначаються з масивів  $\mathbf{M}^{r1}$  і  $\mathbf{M}^{r1}$ .

Карта впливу відмов запірної арматури на постачання цільового продукту є двовимірним масивом  $\mathbf{M}^{32}$ . Перший вимір масиву визначає споживача (індекс  $r$ ), другий – запірну арматуру (індекс  $j$ ). Прообразом такого масиву є табл. 5.12, де  $R$  – кількість споживачів в мережі;  $J$  – кількість засувов в мережі.

Таблиця 5.12 – Карта впливу відмов запірної арматури на постачання цільового продукту (масив  $\mathbf{M}^{32}$ )

	1	2	...	$j$	...	$J$
1	$m_{11}$	$m_{12}$	...	$m_{1j}$	...	$m_{1J}$
2	$m_{21}$	$m_{22}$	...	$m_{2j}$	...	$m_{2J}$
...	...	...	...	...	...	...
$r$	$m_{r1}$	$m_{r2}$	...	$m_{rj}$	...	$m_{rJ}$
...	...	...	...	...	...	...
$R$	$m_{R1}$	$m_{R2}$	...	$m_{Rj}$	...	$m_{RJ}$

Значення елементу  $m_{rj}$  масиву  $\mathbf{M}^{32}$  визначається залежно від впливу відмови  $j$ -ї засувки на постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві, а саме:

$$m_{rj} = \begin{cases} 0, & \text{якщо не впливає;} \\ 1, & \text{якщо перериває постачання;} \\ 2, & \text{якщо залежить від інших елементів мережі.} \end{cases}$$

Для заповнення масиву  $\mathbf{M}^{32}$  використовують ті ж схеми графів АРЗ відносно конкретних споживачів, що й для заповнення масиву  $\mathbf{M}^{12}$ , тобто схеми на рис. 5.2 – 5.5.

В умовах прикладу карта впливу відмов запірної арматури на постачання цільового продукту конкретним споживачам відповідає табл. 5.13.

Таблиця 5.13 – Карта впливу відмов засувки на постачання цільового продукту конкретним споживачам (масив  $\mathbf{M}^{32}$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Масив  $\mathbf{M}^{32}$  дозволяє при проведенні обчислювального експерименту виключити з розрахунку функціональної надійності мережі стосовно конкретних споживачів ті відмови запірної арматури, що не впливають на постачання цільового продукту цим споживачам. Виключення здійснюється на основі послідовного аналізу всіх відмов запірної арматури.

Аналіз  $k$ -ї відмови (в умовах прикладу  $k \in \{1, 154\}$ ) здійснюється за правилами:

– якщо елемент  $m_{rj}$  масиву  $\mathbf{M}^{32}$  дорівнює нулю, то відмова відповідного елемента мережі ( $j$ -ї засувки) не впливає на постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві. Така відмова не враховується при розрахунку функціональної надійності мережі стосовно  $r$ -го споживача;

– якщо елемент  $m_{rj}$  масиву  $\mathbf{M}^{32}$  рівний одиниці, то відмову відповідного елемента мережі має безпосереднє відношення до переривання постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві. Таку відмову обов'язково враховують при розрахунку функціональної надійності мережі стосовно  $r$ -го споживача;

– якщо елемент  $m_{rj}$  масиву  $\mathbf{M}^{32}$  дорівнює двом, то вплив цієї відмови на постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві залежить від наявності відмов інших елементів мережі, що забезпечують альтернативні маршрути постачань, а також від часу їх виникнення і часу усунення. За відсутністю перетину часу усунення  $k$ -ї відмови з часом усунення відмов на інших елементах така відмова також виключається з розрахунку. Елементи мережі, від яких залежить  $k$ -а відмова, для кожного  $r$ -го споживача визначаються з відповідної розрахункової моделі (рис. 5.2 – 5.5 в умовах прикладу). Час виникнення  $\tilde{t}_k$  й час усунення  $\tau_k$   $k$ -ї відмови та всіх наявних відмов інших елементів, від яких залежить  $k$ -а відмова, визначаються з масивів  $\mathbf{M}^{11}$  і  $\mathbf{M}^{31}$ .

### 5.7. Побудова строкових діаграм постачання цільового продукту конкретним споживачам

Щоб при проведенні обчислювального експерименту врахувати можливість одночасного виникнення різних відмов на мережі й забезпечити неможливість спотворення результуючої надійності, для кожного споживача окремо будують строкову діаграму постачання цільового продукту з позначеннями всіх переривань постачання ЦП цьому споживачеві протягом розрахункового періоду часу  $T$ .

Всі діаграми будують на підставі масивів:

–  $\mathbf{M}^{11}$  із значеннями параметрів відмов трубопроводів (в умовах прикладу масив відповідає табл. 5.9);

–  $\mathbf{M}^{31}$  із значеннями параметрів відмов запірної арматури (в умовах прикладу масив відповідає табл. 5.5);

–  $\mathbf{M}^{12}$ , що визначає залежність постачань цільового продукту конкретним споживачам від відмов трубопроводів (у загальному випадку масив відповідає табл. 5.10, в умовах прикладу – табл. 5.11);

–  $\mathbf{M}^{32}$ , що визначає залежність постачань цільового продукту конкретним споживачам від відмов запірної арматури (у загальному випадку масив відповідає табл. 5.12, в умовах прикладу – табл. 5.13).

Крім того, якщо хоча би один з масивів  $\mathbf{M}^{12}$  і  $\mathbf{M}^{32}$  в  $r$ -му рядку має один або більше елементів зі значенням 2, то для побудови діаграми



постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві використовують відповідну розрахункову модель функціональної надійності.

Розглянемо методику побудови строкової діаграми у разі відсутності в  $\mathbf{M}^{12}$  та  $\mathbf{M}^{32}$  в  $r$ -му рядку масивів  $\mathbf{M}^{12}$  та  $\mathbf{M}^{32}$  елементів зі значенням 2 (в умовах прикладу таких рядків немає).

Строкову діаграму будують на осі часу, шкала якої охоплює розрахунковий період  $T$ . В умовах прикладу  $T = 365$  днів.

Для зручності вісь часу треба подавати вертикально. Це дозволяє будувати діаграму на декількох послідовних листах паперу. Вісь часу дублюють для кожної АРЗ та кожної засувок, які в масивах  $\mathbf{M}^{12}$  і  $\mathbf{M}^{32}$  мають ненульові значення. Дубльовані осі проводяться паралельно з основною на відстані, що дозволяє зручно розмістити їх по ширині сторінки. В умовах прикладу строкова діаграма постачання цільового продукту кожному споживачеві, крім споживача **Оп<sub>2</sub>**, згідно табл. 5.11, матиме 10 дубльованих осей з індексами від 1 до 10 для АРЗ та, згідно табл. 5.13 – 17 дубльованих осей з індексами від 1 до 17 для засувок. Строкова діаграма постачання стосовно споживача **Оп<sub>2</sub>**, згідно табл. 5.11, матиме 4 дубльовані осі з індексами від 1 до 4 для АРЗ та, згідно табл. 5.13, 8 дубльованих осей з індексами від 1 до 8 для засувок.

За індексом АРЗ з табл. 5.9 вибирають час виникнення і час усунення відмов і відзначають відповідні ним періоди існування відмов у вигляді відрізків на осі з однойменним індексом. На кожній дубльованій осі буде стільки відрізків, скільки разів даний індекс зустрічається в першому рядку табл. 5.9. Якщо час усунення (існування) відмови перевищує величину 365, то відповідне перевищення переносять на початок осі.

Аналогічно поступають з відмовами запірної арматури, але використовуючи вже табл. 5.5.

Після побудови відрізків на всіх дубльованих осях приступають до їх аналізу й корекції (у разі потреби). Аналізують осі АРЗ. Якщо відрізки на осі яким-небудь чином перекриваються, то проводять штучну корекцію шляхом найменшого зсуву відрізків удовж осі так, щоб виключити накладення. Аналізу повинні послідовно піддатися всі осі АРЗ.

Потім всі відрізки кожної дубльованої осі проектують на основну вісь. В результаті проектування основна вісь також складатиметься з проекцій відрізків. При цьому різниця між значенням розрахункового періоду  $T$  та сумарною довжиною всіх проекцій відрізків, віднесена до всього розрахункового періоду  $T$ , покаже шукану імовірність постачання цільового продукту споживачеві:

$$\tilde{P}^{f_r} = \frac{T - \sum_{i=1}^w \Delta t_i}{T}. \quad (5.18)$$

Тут  $w$  – загальне число відрізків на основній осі часу після їх проекції на основну вісь;  $\Delta t_i$  – довжина  $i$ -го відрізка часу [ доба ].

Розглянута процедура побудови тимчасової діаграми постачання цільового продукту споживачеві не дуже складна. У процесі побудови строкової діаграми не було необхідності вдаватися до розрахункових моделей функціональної надійності. Зовсім інакше йде справа з побудовою тимчасової діаграми для споживача, стосовно якого рядок у масиві  $\mathbf{M}^{t2}$  або  $\mathbf{M}^{z2}$  має хоча би один елемент зі значенням 2 (в умовах прикладу це має місце стосовно рядка).

Розглянемо особливості побудови тимчасової діаграми в разі наявності в  $r$ -му (мається на увазі побудова строкової діаграми для  $r$ -го споживача) хоча б одного елемента зі значенням 2.

Дубльовані осі будуються для кожної АРЗ та кожної засувки, якщо в  $r$ -му рядку табл. 5.10 і 5.12 немає нульових елементів. На кожній дубльованій осі позначаються відрізки часу усунення виникаючих відмов. Кожна дубльована вісь аналізується на предмет перекриття відрізків. У разі перекриття відрізків в межах однієї осі або виходу відрізка за верхню межу розрахункового періоду проводиться відповідна корекція.

Потім проводиться додаткова корекція для кожної дубльованій осі, якій в табл. 5.10 або 5.12 в  $r$ -му рядку відповідає клітинка із значенням 2. В умовах прикладу додатковій корекції повинні піддатися всі дубльовані осі для АРЗ та засувки, коли будуються строкові діаграми для споживачів **Оп<sub>1</sub>**, **Оп<sub>3</sub>** та **Оп<sub>4</sub>**.

Корекція для кожної дубльованій осі здійснюється на основі аналізу розрахункової моделі стосовно відповідного споживача, яка дозволяє виявити елементи мережі, від яких залежить переривання постачання цільового продукту споживачеві в періоди усунення відмов, відповідних відрізкам на осі, що коректується. Дубльовані осі виявлених елементів мережі проектується на цю вісь. Всі відрізки або їх частини, які не перекриваються спроектованими відрізками, вилучаються з осі, оскільки в цьому випадку постачання цільового продукту споживачеві не уривається.

Коли дубльовані осі будуть скоректовані, проводять проектування всіх дубльованих осей на основну вісь часу. Шукана ймовірність постачання цільового продукту визначиться за формулою (5.18)

*Примітка.* При перевірці адекватності вважається, що служби експлуатації трубопровідної мережі мають достатню кількість ремонтних бригад, для усунення одночасно виникаючих відмов. Тільки в цьому випадку ймовірність безперебійного постачання цільового продукту конкретному користувачеві співпадає з відносним часом отримання продукту цим користувачем. Якщо число ремонтних бригад обмежене величиною  $N_6$ , то цей факт треба враховувати при корекції дубльованих осей і при проектуванні їх на основну вісь. Якщо при накладенні осей, число співпадаючих відрізків перевищує величину  $N_6$ , необхідно провести відповідний зсув відрізків на осях.

Розрахунок за формулою (5.18) дозволяє отримати частині, а точніше – випадкові значення показників функціональної надійності  $\tilde{P}^{f_r}$ . Для набуття дійсних значень необхідно повторити обчислювальний експеримент і розрахунки чималу кількість разів, потім завершальний розрахунок істинних значень показників здійснювати за формулою (5.1).

## РОЗДІЛ 6

### РЕАЛІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ З ПЕРЕВІРКИ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАДІЙНОСТІ

#### 6.1. Процедури універсального обчислювального експерименту для перевірки адекватності моделей функціональної надійності трубопровідних систем

Організація обчислювального експерименту з перевірки адекватності моделей функціональної надійності навіть для нескладних трубопровідних систем потребує багато часу й наполегливої праці.

Не хай для системи довільної складності вже за допомогою методу АРЗ розраховані показники функціональної надійності системи стосовного кожного споживача системи, тобто визначені величини  $P^{f_k}$ , де  $k = \overline{1, P}$ ;  $P$  – загальна кількість споживачів. Розрахунок показників функціональної надійності припускає, що програмно реалізовані всі етапи методу АРЗ. А це означає, що введені всі основні початкові дані про структуру та параметри трубопровідної мережі, побудований початковий граф мережі, проведено розбиття графа мережі на підграфи АРЗ, розраховані показники технічної надійності кожної АРЗ, побудовані та спрощені графи АРЗ мережі стосовно кожного споживача, визначені розрахункові моделі функціональної надійності. Тоді обчислювальний експеримент для систем довільної складності припускає розробку та налагодження програмного забезпечення для наступних процедур:

1. Розбиття за початковими даними всіх трубопровідних ділянок (протяжних елементів) мережі на однорідні групи залежно від інтенсивності виникнення відмов  $\lambda$  та інтенсивності відновлення  $\mu$ .

2. Розташування трубопровідних ділянок кожної однорідної групи в одну координатну лінію. Визначення загальної довжини ділянок, координат початку й кінця кожної ділянки. Формування масиву  $G^g$  для кожної  $g$ -ї групи трубопровідних ділянок.

3. Визначення загального числа відмов на трубопровідних ділянках для кожної однорідної групи протягом розрахункового періоду часу  $T$ .

4. Визначення параметрів відмов трубопровідних ділянок. Формування масиву  $\mathbf{M}^{t1}$ .

5. Розбиття запірної арматури на однорідні групи залежно від ймовірності їх безвідмовної роботи. Формування масиву  $\mathbf{H}^h$  для кожної  $h$ -ї групи запірної арматури.

6. Визначення загального числа відмов на запірній арматурі для кожної однорідної групи протягом розрахункового періоду часу  $T$ .

7. Визначення параметрів відмов запірної арматури. Формування масиву  $\mathbf{M}^{31}$ .

8. Прив'язка відмов трубопровідних ділянок до аварійно-ремонтних зон. Перетворення масиву параметрів відмов трубопроводів  $\mathbf{M}^{t1}$  в масив  $\mathbf{M}^{n1}$ .

9. Складання карти впливу відмов в АРЗ на постачання цільового продукту конкретним споживачам. Формування масиву  $\mathbf{M}^{t2}$ .

10. Складання карти впливу відмов запірної арматури на постачання цільового продукту конкретним споживачам. Формування масиву  $\mathbf{M}^{32}$ .

11. Побудова основної осі часу для строкової діаграми постачання цільового продукту  $r$ -му споживачеві мережі та її дублювання для відмов кожної АРЗ і кожної засувки, яким відповідають ненульові елементи в  $r$ -х рядках масивів  $\mathbf{M}^{t2}$  і  $\mathbf{M}^{32}$ . Надавання строковим осям індексів, відповідних індексам АРЗ й засувки.

12. Побудова відрізків, що визначають час виникнення і тривалість відмов в АРЗ або запірній арматурі, на відповідній дубльованій осі.

13. Корекція розташування відрізків на кожній осі у разі їх перекриття.

14. Аналіз і додаткова корекція дубльованих осей для тих елементів мережі, яким в  $r$ -х рядках масивів  $\mathbf{M}^{t2}$  і  $\mathbf{M}^{32}$  відповідають елементи із значенням 2.

15. Проектування відрізків дубльованих осей на основну строкову вісь діаграми. Розрахунок показника функціональної надійності стосовно  $r$ -го споживача.

16. Повторення процедур з пунктів 11 – 16 для кожного споживача системи.

17. Повторення всіх процедур з пунктів 1 – 17 чималу кількість разів для отримання за формулою (5.1) дійсного значення показника функціональної надійності та його порівняння з розрахунковим.

Наведена послідовність процедур є універсальною, оскільки дозволяє перевірити адекватність математичних моделей функціональної

надійності систем з довільною структурою і складом трубопровідних мереж.

## 6.2. Особливості обчислювального експерименту з перевірки адекватності моделей функціональної надійності простих трубопровідних систем

Як вже згадувалося раніше, з метою зниження трудомісткості проведення експерименту треба як тестові системи вибирати системи з простими структурами трубопровідних мереж. Прикладами таких систем можуть служити магістральні трубопроводи, що складаються з двох паралельних ниток трубопроводів, сполучених однією перемичкою.

На рис. 6.1 – 6.3 зображені початкові графи трьох варіантів магістральних мереж з нескладними трубопровідними мережами.

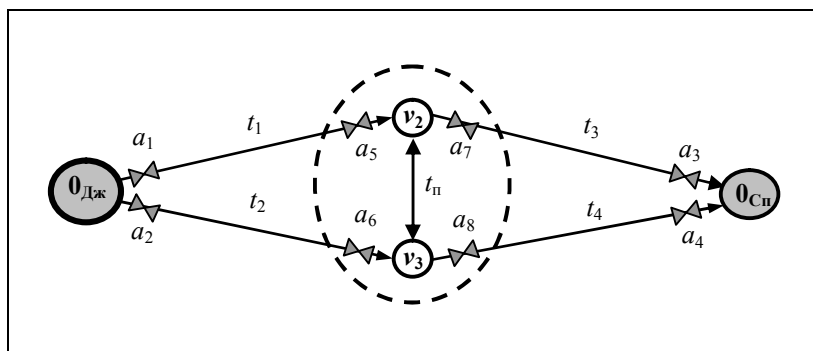


Рис. 6.1 – Граф-схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з чотирма засувками

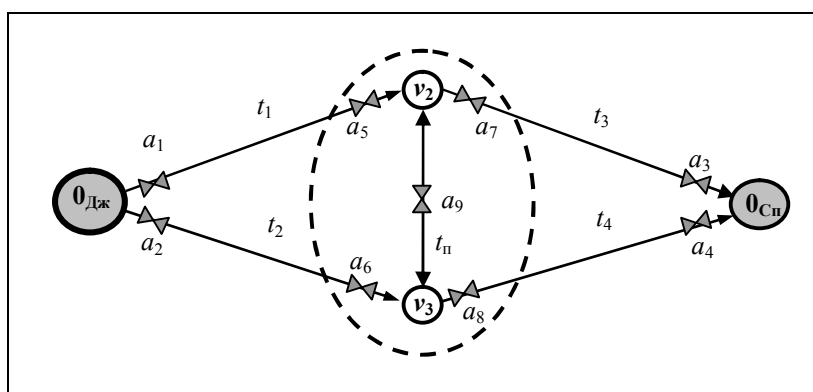


Рис. 6.2 – Граф-схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з п'ятьма засувками

Пунктирними овалами на схемах (рис. 6.1 – 6.3) виділені перемички, що сполучають дві нитки паралельних трубопроводів. У всіх системах через трубопровідну мережу транспортується цільовий продукт від одного джерела до одного споживача.

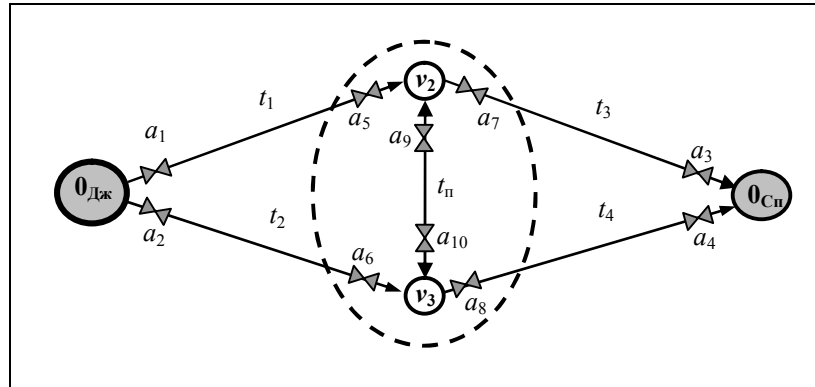


Рис. 6.3 – Граф-схема системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з шістьма засувками

Зображені на рис. 6.1 – 6.3 системи відрізняються одна від одної тільки кількістю засувки на центральній трубі перемички:

- перша система не має засувки;
- друга система має одну засувку ( $a_9$ );
- третя система має дві засувки ( $a_9$  і  $a_{10}$ ).

Обчислювальний експеримент для перевірки адекватності математичних моделей надійності систем з простими структурами трубопровідних мереж значно спрощується в порівнянні з універсальним експериментом. Він має меншу трудомісткість і здійснюється у припущенні, що всі засувки володіють абсолютною надійністю. У цьому випадку засувки не впливають на переривання постачань цільового продукту споживачам і не беруть участь в обчислювальному експерименті. Послідовність процедур, що реалізовує такий експеримент, буде найкоротшою, а сам експеримент по трудомісткості – найлегший.

Наведемо послідовність процедур обчислювального експерименту, який проводиться за умови, що ймовірність виходу з ладу будь-якої засувки трубопровідної мережі протягом розрахункового періоду  $T$  дорівнює нулю. З метою порівняння методик проведення експериментів по трудомісткості нумерацію процедур залишимо таку, яка була в універсальній послідовності (див. попередній п. 6.1):

1. Процедура відсутня.
  2. Розташування всіх трубопровідних ділянок мережі в одну координатну лінію. Визначення загальної довжини ділянок, координат початку і кінця кожної ділянки. Формування тільки одного масиву  $G$ .
  3. Визначення загального числа відмов на трубопровідних ділянках протягом розрахункового періоду часу  $T$ .
  4. Визначення параметрів відмов трубопровідних ділянок. Формування масиву  $M^{T1}$ .
  5. Процедура відсутня.
  6. Процедура відсутня.
  7. Процедура відсутня.
  8. Прив'язка відмов трубопровідних ділянок до аварійно-ремонтних зон. Перетворення масиву параметрів відмов трубопроводів  $M^{T1}$  у масив  $M^{п1}$ .
  9. Складання карти впливу відмов в АРЗ на постачання цільового продукту споживачеві. Формування одновимірної масиву  $M^{T2}$ .
  10. Процедура відсутня.
  11. Побудова осі часу на строковій діаграмі постачання цільового продукту споживачеві та її дублювання для відмов кожної АРЗ, яким відповідають ненульові елементи в масиві  $M^{T2}$ . Надавання строковим осям індексів АРЗ.
  12. Побудова відрізків, що визначають час виникнення і тривалість відмов в АРЗ, на відповідній дубльованій осі.
  13. Корекція розташування відрізків на кожній осі у разі їх перекриття.
  14. Аналіз і додаткова корекція дубльованих осей для тих АРЗ, яким в масиві  $M^{T2}$  відповідають елементи із значенням 2.
  15. Проектування відрізків дубльованих осей на основну вісь часу строкової діаграми. Розрахунок показника функціональної надійності постачання цільового продукту споживачеві.
  16. Пункт відсутній.
  17. Повторення всіх процедур з пунктів 1 – 17 чималу кількість разів для отримання за формулою (5.1) дійсного значення показника функціональної надійності та його порівняння з розрахунковим.
- У наведеній послідовності відсутня процедура пункту 1 унаслідок однорідності відмов на всіх трубопровідних ділянках. Процедури пунктів



5 – 7 і 10 відсутні через прийняте припущення про абсолютну надійність всієї запірної арматури мережі. Пункт 16 відсутній у зв'язку з наявністю в системі тільки одного споживача. Процедури решти пунктів спрощуються з тих же причин.

### **6.3. Спрощений обчислювальний експеримент по перевірці адекватності моделей функціональної надійності простих трубопровідних мереж**

Перевіримо адекватність математичних моделей, отриманих методом АРЗ, для систем, схеми яких зображені на рис. 6.1 – 6.3.

Трубопровідні мережі всіх систем мають однакові магістральні трубопровідні ділянки  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ). Системи відрізняються один від одного тільки кількістю засувки на центральній трубі перемички.

Нехай трубопровідні ділянки  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) всіх систем мають рівні параметри, а саме: довжина 100 км.; інтенсивність відмов  $0,1 \text{ км.}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ; інтенсивність відновлення  $\mu = 365 \text{ год}^{-1}$ . Нехай також імовірність безвідмовної роботи будь-якої засувки дорівнює одиниці.

Оскільки довжина центральної труби перемички, на декілька порядків менше довжини будь-якої трубопровідної ділянки мережі, то приймаємо її рівною нулю.

Таким чином, всі елементи систем на рис. 6.1 – 6.3, окрім трубопровідних ділянок, є абсолютно надійними. При такому допущенні всі три системи матимуть однакову математичну модель функціональної надійності

$$P^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2, \quad (6.1)$$

де  $p$  – ймовірність безвідмовної роботи трубопроводу, довжина якого  $l$  в 2 рази більше довжини будь-якої з ділянок, тобто  $l = 200 \text{ км.}$

При заданих початкових даних

$$p = 1 - \frac{l\lambda}{\mu} = 1 - \frac{200 \cdot 0,1}{365} = 0,9452, \quad (6.2)$$

а функціональна надійність, згідно з математичною моделлю (6.1), дорівнює 0,9985.

Проміжним результатом у процесі отримання моделі (6.1) є розрахункова графічна модель, зображена на рис. 6.4. У моделі відсутні блоки, відповідні засувкам і аварійно-ремонтним зонам з абсолютною надійністю. Блоки з вірогідністю  $p_i$  ( $i \in \{1, 4\}$ ) відповідають однойменним АРЗ.

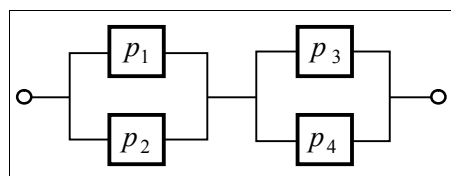


Рис. 6.4 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою

Доведемо адекватність моделі (6.1) за допомогою спрощеного обчислювального експерименту.

Згідно з послідовністю спрощеного експерименту перша процедура (п. 2) розташовує всі трубопровідні ділянки мережі в одну координатну лінію (рис. 6.5) і формує масив  $G$  (табл. 6.1).

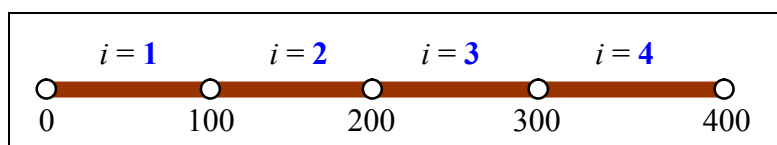


Рис. 6.5 – Координатна лінія для трубопровідних ділянок

Таблиця 6.1 – Елементи масиву  $G$

$r \backslash j$	1	2	3	4
1	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
2	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>

Потім визначається загальне число  $n$  відмов трубопровідних ділянок (п. 3) протягом розрахункового періоду часу  $T$  по формулі (5.2). В умовах спрощеного експерименту формула (5.2) набуває вигляду

$$n = \text{int} \left( \lambda \sum_{i=1}^{\text{Card } E} l(t_i) + 0,5 \right). \quad (6.3)$$

При заданих початкових даних

$$n = \text{int}\left(0,1 \sum_{i=1}^4 l(t_i) + 0,5\right) = 40. \quad (6.4)$$

Далі, відповідно до п. 4 послідовності процедур спрощеного обчислювального експерименту визначаються параметри відмов трубопроводних ділянок, і формується масив параметрів відмов **M** (табл. 6.2). На відміну від табл. 5.3, в табл. 6.2 відсутній третій рядок, оскільки він не несе ніякої корисної інформації із-за однакової тривалості всіх відмов  $\Delta t_k = \text{const} = 1 \text{ сутки}$ .

Таблиця 6.2 – Значення параметрів відмов трубопроводів (масив **M**)

Індекс параметра $r$	Параметр	Індекс відмови $k$			
		1	2	...	40
1	Індекс місця	$f_1$	$f_2$	...	$f_{40}$
2	Час появи	$\tilde{t}_1$	$\tilde{t}_2$	...	$\tilde{t}_{40}$

У табл. 6.2 значення параметра  $f_k$  ( $k = \overline{1,40}$ ) визначається за допомогою рекурсивної функції

$$f_k(j, x) = \begin{cases} g_{1j}, & \text{якщо } x < g_{2j}; \\ f_k(j+1, x), & \text{якщо } x \geq g_{2j}, \end{cases} \quad (6.5)$$

де  $j, x$  – параметри рекурсивної функції;  $g_{1j}, g_{2j}$  – елементи масиву **G**.

При кожному зверненні до функції (6.5) її цілочисловий параметр  $j$  завжди дорівнює 1, а параметр  $x$  є дійсне число, що визначається виразом

$$x = l \cdot \tilde{x} = 400 \cdot \tilde{x}.$$

Тут  $l$  – загальна протяжність всіх трубопроводів мережі;  $\tilde{x}$  – випадкова величина, що отримуємо внаслідок звернення до генератора випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1.

Випадкове значення параметра  $\tilde{t}_k$  ( $k = \overline{1,40}$ ) встановлюється за формулою (5.9).

Наступна процедура повинна відповідати п. 8. Але, оскільки кожна АРЗ мережі містить тільки одну трубопроводну ділянку та індекси ділянок співпадають з індексами АРЗ, то процедура прив'язки АРЗ є надмірною.

Виконання процедури приведе до отримання масиву  $\mathbf{M}^{\text{п1}}$ , який нічим не відрізняється від масиву  $\mathbf{M}^{\text{т1}}$ . Таким чином, дана процедура в спрощеному експерименті для систем на рис. 6.1 – 6.3, як і всі процедури п.п. 1, 5 – 7, 10 і 16, відсутня.

При формуванні масиву  $\mathbf{M}^{\text{т1}}$  можлива ситуація, коли на одному й тому ж трубопроводі (однакові значення першого рядка табл. 6.2) відповідають відмови з однаковим часом появи (однакові значення другого рядка табл. 6.2). Для виправлення ситуації співпадаючі відмови примусово розносять в часі: додають або віднімають від часу виникнення відмови ціле число діб до повного усунення збігів. Скоректований масив  $\mathbf{M}^{\text{т1}}$  сортують за збільшенням часу виникнення відмови.

Виконання всіх подальших процедур (окрім останньої, п. 17) еквівалентно виконанню однієї процедури, схема алгоритму якої зображена на рис. 6.6.

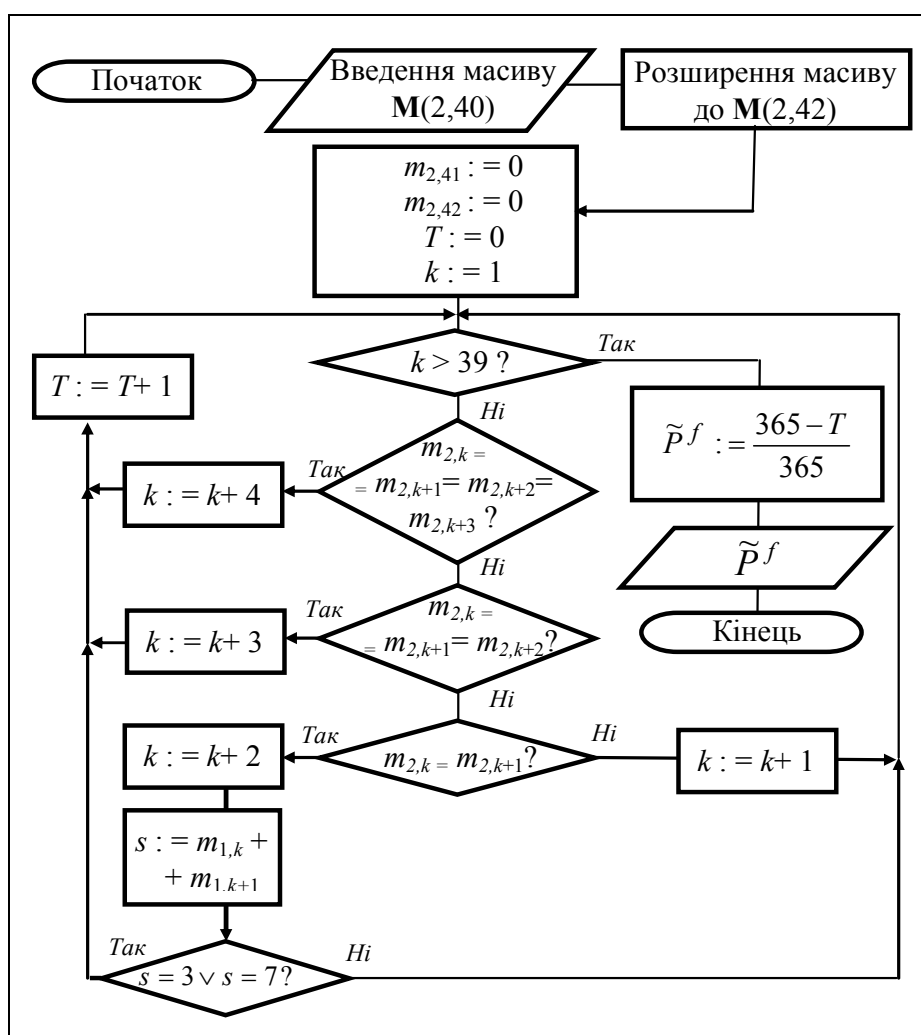


Рис. 6.6 – Схема алгоритму розрахунку  $\tilde{P}^f$  за даними масиву  $\mathbf{M}$

Результатом виконання останньої процедури є випадкове значення показника функціональної надійності  $\tilde{P}^f$ .

Згідно з останньою процедурою п. 17  $n$ -разове виконання всієї послідовності процедур за визначенням показника  $\tilde{P}^f$  і обчисленням його середнього значення  $P_{\text{ср.}}^f$  за формулою (5.1) дозволяє побачити тенденцію зміни  $P_{\text{ср.}}^f$  залежно від  $n$ . Якщо  $P_{\text{ср.}}^f$  із зростанням  $n$  наближається до значення 0,9985, отриманому за допомогою математичної моделі (6.1), то адекватність останньою буде доведена.

Результати обчислювального експерименту (ОЭ-1) за спрощеною методикою подані у вигляді табл. 6.3 й діаграми на рис. 6.7.

Таблиця 6.3 – Результати обчислювального експерименту ОЭ-1

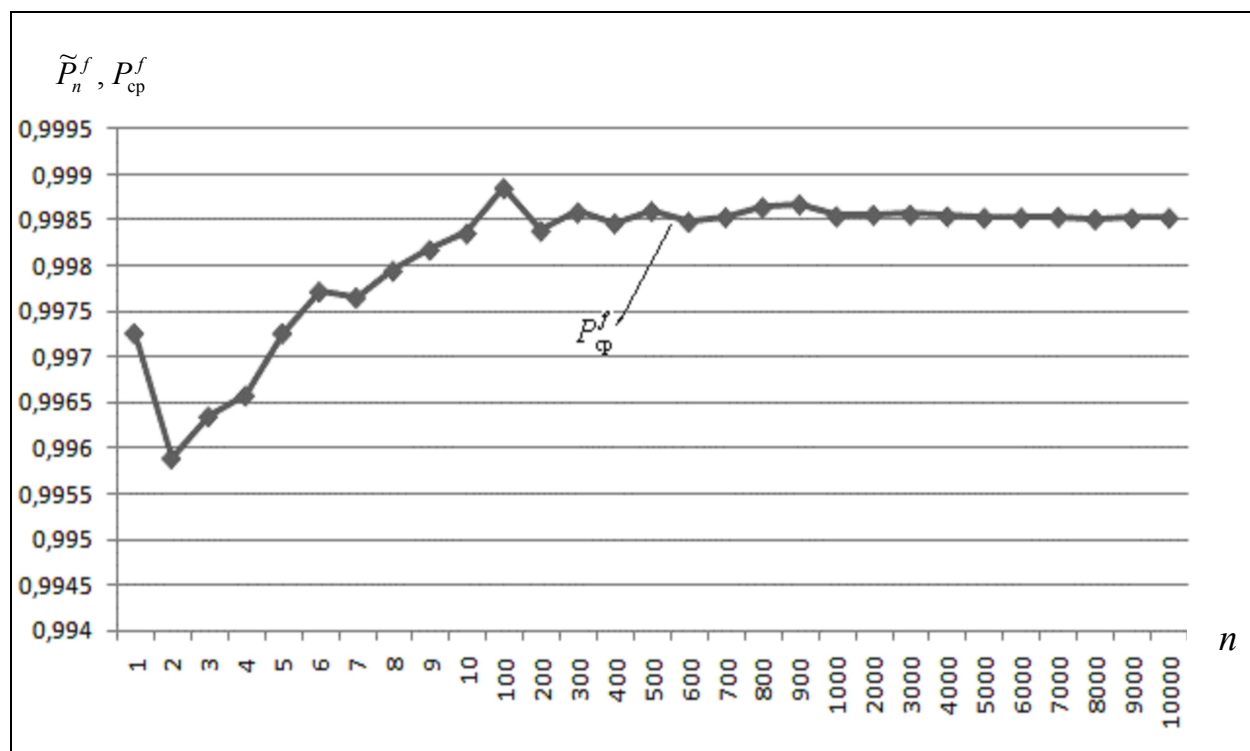
Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^f$	$P_{\text{ср.}}^f$
1	2	3
1	0,997260	0,997260
2	0,994521	0,995890
3	0,997260	0,996347
4	0,997260	0,996575
5	1	0,997260
6	1	0,997717
7	0,997260	0,997652
8	1	0,997945
9	1	0,998174
10	1	0,998356
20	1	0,998630
30	1	0,998995
40	1	0,998904
50	1	0,998959
60	0,997260	0,998858
70	1	0,998943
80	0,997260	0,998973

Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^f$	$P_{\text{ср.}}^f$
1	2	3
90	1	0,998874
100	1	0,998849
200	1	0,998384
300	0,997260	0,998584
400	0,997260	0,998466
500	0,997260	0,998597
600	1	0,998479
700	1	0,998532
800	1	0,998640
900	1	0,998673
1000	1	0,998542
1100	0,994521	0,998446
1200	0,99726	0,998530
1300	1	0,998582
1400	1	0,998458
1500	0,99726	0,998579
1600	1	0,998580

Продовження табл. 6.3

1	2	3
1700	1	0,998546
1800	1	0,998452
1900	1	0,998538
2000	0,994521	0,998558
3000	0,99726	0,998561
4000	1	0,998542

1	2	3
5000	1	0,998525
6000	0,994521	0,998527
7000	1	0,998535
8000	0,99726	0,998510
9000	0,99726	0,998521
10000	0,99726	0,998524

Рис. 6.7 – Діаграма  $P_{\text{ср.}}^f$  залежно від кількості експериментів  $ni$ 

*Примітка.* Стрибок на діаграмі при значенні абсциси  $i = 200$  обумовлений нерівномірністю шкали абсцис.

Дані в табл. 6.3 і діаграма на рис. 6.7 показують, що із зростанням числа експериментів середнє значення надійності  $P_{\text{ср.}}^f$  неухильно прагне до значення 0,9985. Саме таке значення отримують за допомогою математичної моделі (6.1). Отже адекватність моделі (6.1) доведена.

#### 6.4. Обчислювальний експеримент з перевірки адекватності моделей функціональної надійності з урахуванням надійності запірної арматури

Обчислювальний експеримент значно ускладнюється, якщо при розрахунку показника функціональної надійності враховувати надійність запірної арматури. Більше того обчислювальні експерименти для трьох систем на рис. 6.1 – 6.3 відрізнятимуться один від одного, тому що трубопровідні мережі мають різні математичні моделі.

На рис. 6.8 – 6.10 наведені графи АРЗ для систем, що зображені на рис. 6.1 – 6.3, на рис. 6.11 – 6.12 - розрахункові схеми функціональної надійності для систем відповідно з чотирма й п'ятьма засувками в перемичці.

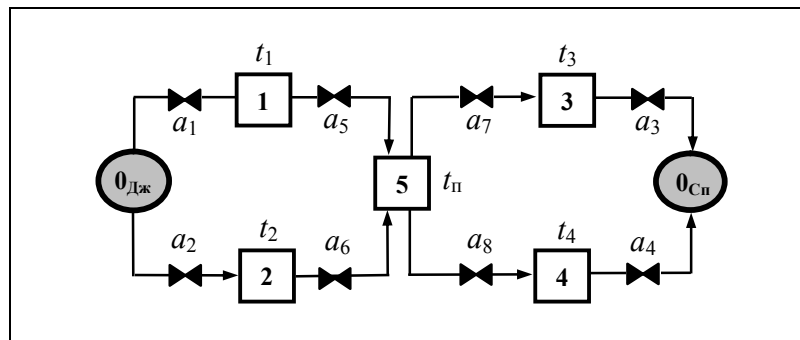


Рис. 6.8 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з чотирма засувками

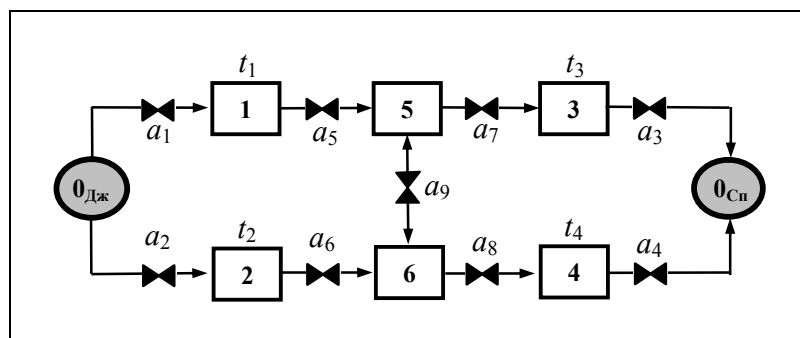


Рис. 6.9 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з п'ятьма засувками

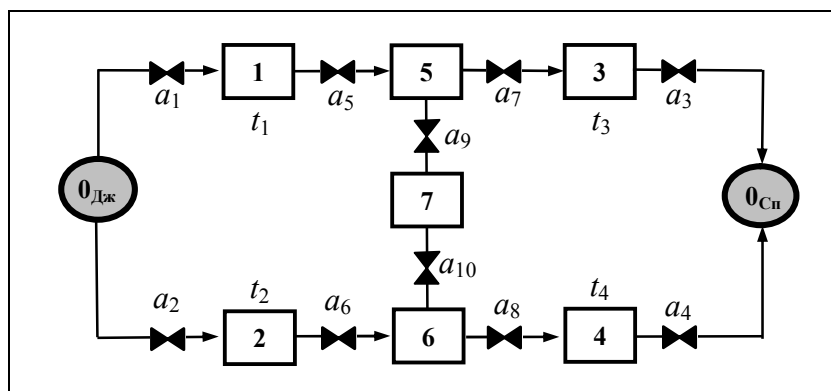


Рис. 6.10 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з шістьма засувками

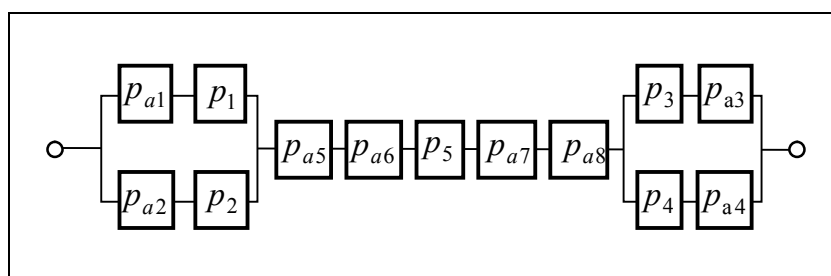


Рис. 6.11 – Розрахункова схема функціональної надійності для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з чотирма засувками

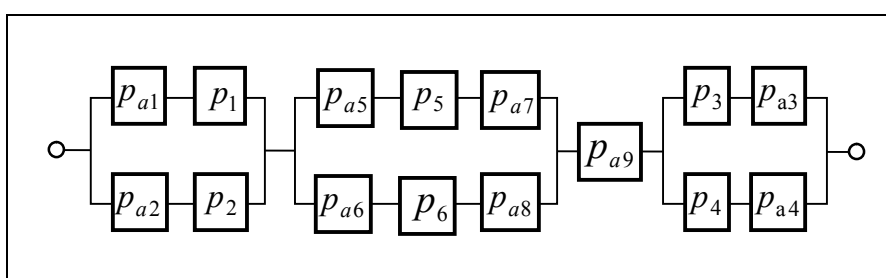


Рис. 6.12 – Розрахункова схема функціональної надійності для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з п'ятьма засувками

На жаль, для системи, що зображена на рис. 6.10, скласти аналогічну розрахункову схему не має можливості. Суто мостова схема графа АРЗ стосовно 7-зони вимагає розрахунку функціональної надійності системи за допомогою теореми про повну імовірність. У даному випадку використання цієї теореми здійснюють за виразом



$$P^{f_3} = (1 - p_7)P_{AP3}^{f_3} + p_7P_{AP3}^{f_3}, \quad (6.6)$$

де  $P^{f_3}$  – шукана функціональна надійність трубопровідної мережі, що зображена на рис. 6.10);  $p_7$  – ймовірність безвідмовної роботи АРЗ №7;  $P_{AP3}^{f_3}$  – умовна функціональна надійність трубопровідної мережі за умови непрацездатності АРЗ №7;  $P_{AP3}^{f_3}$  – умовна функціональна надійність трубопровідної мережі за умови працездатності АРЗ №7.

Згідно виразу (6.6) для розрахунку функціональної надійності системи  $P^{f_3}$  треба попередньо побудувати дві розрахункові схеми: одну – для визначення умовної функціональної надійності  $P_{AP3}^{f_3}$  (рис. 6.13), другу – для визначення умовної функціональної надійності  $P_{AP3}^{f_3}$  (рис. 6.14).

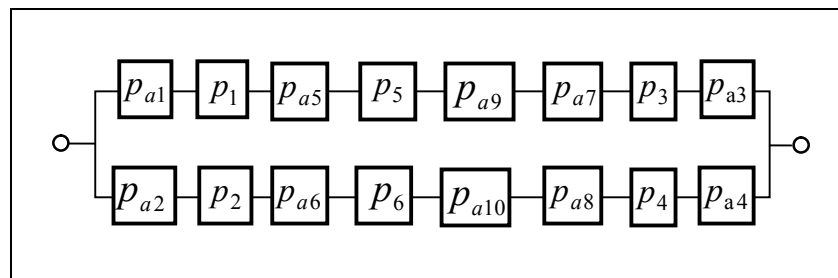


Рис. 6.13 – Розрахункова схема для визначення умовної функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з шістьма засувками, за умови непрацездатності АРЗ №7

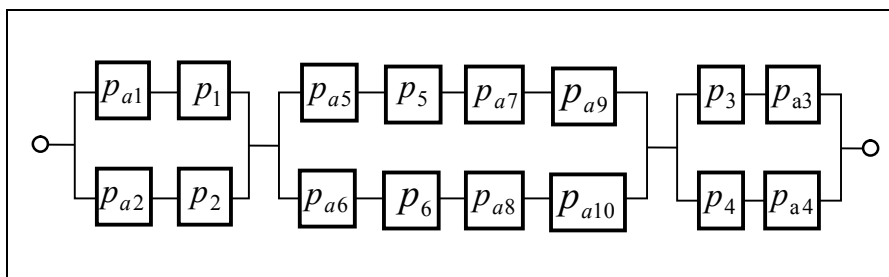


Рис. 6.14 – Розрахункова схема для визначення умовної функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою з шістьма засувками, за умови працездатності АРЗ №7

Нехай трубопровідні ділянки  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) всіх систем на рис. 6.1 – 6.3 мають однакові параметри, а саме: довжина  $l_i = 100$  км.; інтенсивність відмов  $\lambda = 0,1$  км.<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>; інтенсивність відновлення  $\mu_t = 365$  год<sup>-1</sup>. Хай також імовірність безвідмовної роботи  $p_a$  кожної засувки дорівнює 0,9918, а інтенсивність відновлення співпадає з інтенсивністю відновлення трубопровідних ділянок, тобто  $\mu_a = \mu_t = 365$  год<sup>-1</sup>.

Оскільки довжини всіх трубопровідних ділянок перемички і трубопровідних ділянок, що сполучають напірні агрегати з найближчими засувками або споживача з трубопровідною мережею, на декілька порядків менше будь-якої трубопровідної ділянки мережі  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ), то приймаємо довжини перших рівними нулю. Тоді технічні надійності  $p_5 = p_6 = p_7 = 1$  відповідно для АРЗ №5, №6 і №7 дорівнюватимуть одиниці.

Підстановка в вираз (6.6) одиниці замість ймовірності  $p_7$  зводить його до рівності

$$P^{f_3} = P_{AP3}^{f_3}. \quad (6.7)$$

З урахуванням зроблених припущень математичні моделі функціональної надійності, що генеруються методом АРЗ, матимуть вигляд:

– для системи на рис. 6.1 відповідно до розрахункової моделі на рис. 6.11

$$P^{f_1} = p_a^4 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]^2; \quad (6.8)$$

– для системи на рис. 6.2 відповідно до розрахункової моделі на рис. 6.12

$$P^{f_2} = p_a \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]^2 \left[ 1 - (1 - p_a^2)^2 \right]; \quad (6.9)$$

– для системи на рис. 6.3 відповідно до розрахункової моделі на рис. 6.14 та згідно з виразом (6.7)

$$P^{f_3} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]^2 \left[ 1 - (1 - p_a^3)^2 \right]. \quad (6.10)$$

У математичних моделях (6.8) – (6.10), згідно виразу (6.2)  $p = 0,9452$ . Тоді чисельне значення показника функціональної надійності:

– для системи на рис. 6.1 відповідно до математичної моделі (6.8)  $P^{f_1} \approx 0,9652$ ;

– для системи на рис. 6.2 відповідно до математичної моделі (6.9)  $P^{f_2} \approx 0,9890$ ;

– для системи на рис. 6.3 відповідно до математичної моделі (6.10)  $P^{f_3} \approx 0,9969$ .

Доведемо послідовно адекватність математичних моделей (6.8) – (6.10), отриманих методом АРЗ, за допомогою універсальної методики перевірки адекватності, що викладена в підрозділі 6.1.

Для моделі (6.8) послідовність процедур перевірки починатиметься з п.2 (див. с. 160), оскільки всі трубопровідні ділянки однорідні.

Результатом виконання процедури п. 2 є координатна лінія (рис. 6.5) і масив  $G$  (табл. 6.1).

Результатом виконання процедури п. 3 є число відмов трубопровідних ділянок, визначуване за допомогою виразу (6.4).

Результатом виконання процедури п. 4 є масив  $M^T$ , прообразом якого є табл. 6.2.

Процедура п. 5 відсутня внаслідок однорідності всіх засувки в системах.

Наступна процедура п.6 визначає кількість відмов  $m$  на запірній арматурі протягом розрахункового періоду часу  $T$ . У разі однорідності всіх засувки кількість відмов на запірній арматурі розраховують за формулою

$$m = \text{int}[365 \cdot (1 - p_a) m_a + 0,5], \quad (6.11)$$

де  $p_a = 0,9918$  – імовірність безвідмовної роботи засувки протягом періоду часу  $T$ ;  $m_a$  – загальна кількість засувки в системі.

Для системи на рис. 6.1  $m_a = 8$ . Кількість відмов  $m$  відповідно до (6.11) набуває значення 24.

Для системи на рис. 6.2  $m_a = 9$ . Кількість відмов  $m$  відповідно до (6.11) набуває значення 27.

Для системи на рис. 6.3  $m_a = 10$ . Кількість відмов  $m$  відповідно до (6.11) набуває значення 30.

Дискретний характер величини  $m$  є причиною погрішності при визначенні  $m_a$ . Чим менше похибка, тим точніше результат обчислювального експерименту відповідатиме дійсному значенню  $P^f$ .

Обчислення кількості відмов  $m$  для всіх трьох систем має погрішність  $\varepsilon_a = 0,23\%$ . З урахуванням того, що обчислення кількості відмов  $n$  на трубопровідних ділянках здійснювалося без погрішності ( $\varepsilon_r = 0\%$ ), а відновлення трубопровідних ділянок и запірної арматури мають однаковий термін, то загальна погрішність в експерименті визначається за формулою

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{n \cdot \varepsilon_r + m \cdot \varepsilon_a}{n + m} \quad (6.12)$$

і становить:

- для системи з перемичкою з чотирма засувками 0,0862%;
- для системи з перемичкою з п'ятьма засувками 0,0927%;
- для системи з перемичкою з шістьма засувками 0,0986%.

Процедура п. 7 визначає параметри відмов запірної арматури і формує масив параметрів відмов  $\mathbf{M}^{31}$ .

Для системи на рис. 6.1 масив  $\mathbf{M}^{31}$  матиме розмірність  $2 \times 24$  (табл. 6.4), для системи на рис. 6.2 – розмірність  $2 \times 27$ , для системи на рис. 6.3 – розмірність  $2 \times 30$ .

На відміну від табл. 5.4, що рекомендується універсальною методикою проведення експерименту, в табл. 6.4 відсутній третій рядок, тому що він не несе ніякої корисної інформації із-за однакової тривалості всіх відмов  $\Delta t_k = \text{const} = 1 \text{ доба}$ .

Таблиця 6.4 – Значення параметрів відмов запірної арматури (масив  $\mathbf{M}^{31}$ ) для системи на рис. 6.1

Індекс парам. $r$	Параметр	Індекс відмови $k$			
		1	2	...	24
1	Індекс місця	$f_1^*$	$f_2^*$	...	$f_{24}^*$
2	Час настання	$\tilde{t}_1^*$	$\tilde{t}_2^*$	...	$\tilde{t}_{24}^*$

У табл. 6.4 значення параметра  $f_k^*$  ( $k = \overline{1,24}$ ) знаходять за допомогою функції

$$f_k^* = \text{int}(q\tilde{x}_k + 1) \quad (6.13)$$

де  $q$  – кількість засувов в системі (для системи на рис. 6.1  $q = 8$ );  $\tilde{x}$  – випадкова величина, що генерується внаслідок  $k$ -го звернення до генератора випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1;  $\text{int}(\cdot)$  – функція взяття цілої частини числа.

Випадкове значення параметра  $\tilde{t}_k^*$  ( $k = \overline{1,24}$ ) знаходять за формулою (5.16).

Процедура п. 8 не виконується, оскільки є надмірною.

Далі, доцільно для спрощення алгоритму поєднати масиви  $\mathbf{M}^T$  та  $\mathbf{M}^{31}$ . У масиві  $\mathbf{M}^T$  індекси трубопровідних ділянок  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) співпадають з індексами перших чотирьох засувов  $a_j$  ( $j = \overline{1,4}$ ) в масиві  $\mathbf{M}^{31}$ . Тому злиття масивів  $\mathbf{M}^T$  та  $\mathbf{M}^{31}$  можливо тільки за умови попередньої переіндексування запірної арматури. Переіндексування для всіх трьох систем здійснюється згідно з табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Переіндексування запірної арматури

Позначення запірної арматури	Старий індекс	Новий індекс
$a_1$	1	5
$a_2$	2	6
$a_3$	3	7
$a_4$	4	8
$a_5$	5	9
$a_6$	6	10
$a_7$	7	11
$a_8$	8	12
$a_9$	9	13
$a_{10}$	10	14

Об'єднаний масив  $\mathbf{M}$  має структуру, прототипом якої є табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Значення параметрів відмов (об'єднувальний масив **M**)

Параметр	Індекс відмови $k$								
	1	2	...	40	41	42	...	64	65
Індекс місця	$f_1$	$f_2$	...	$f_{40}$	$f_{41}$	$f_{42}$	...	$f_{64}$	*
Час появи	$\tilde{t}_1$	$\tilde{t}_2$	...	$\tilde{t}_{40}$	$\tilde{t}_{41}$	$\tilde{t}_{42}$	...	$\tilde{t}_{64}$	367

У табл. 6.6 фоном відокремлені осередки, елементи яких формуються з елементів масиву  $\mathbf{M}^{31}$  після переіндексування засувки. Формування відокремлених осередків здійснюється таким чином:

$$f_{41} = f_1^*; \quad f_{42} = f_2^*; \quad \dots; \quad f_{64} = f_{24}^*;$$

$$\tilde{t}_{41} = \tilde{t}_1^*; \quad \tilde{t}_{42} = \tilde{t}_2^*; \quad \dots; \quad \tilde{t}_{64} = \tilde{t}_{24}^*.$$

У табл. 6.6 введено фіктивну відмову ( $k = 65$ ). Вона використовується також для спрощення алгоритму. При цьому сенс має тільки параметр «час появи». Значення параметра завжди дорівнює 367. Елемент  $m_{1,65}$  в алгоритмі не використовується.

В об'єднувальному масиві **M** можлива ситуація, коли однаковим значенням індексу місця відповідають відмови з однаковим часом появи. Для виправлення ситуації співпадаючі відмови примусово розносять в часі: додають або віднімають від часу виникнення відмови ціле число діб до повного усунення збігів. Скоректований масив  $\mathbf{M}^{T1}$  сортують за збільшенням часу виникнення відмов.

Виконання всіх подальших процедур (окрім останньої, п. 17) еквівалентно виконанню однієї процедури, схема алгоритму якої зображена на рис. 6.15.

В наведеному алгоритмі логічний вираз  $L_1$  має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 L_1 = & (m_{1,k} = 9) \vee (m_{1,k} = 10) \vee (m_{1,k} = 11) \vee (m_{1,k} = 12) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 1) \vee (m_{1,k} = 5)) \wedge (l_1 \vee (m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6) \vee \\
 & \quad \vee ((m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7)) \wedge ((m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8))) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 2) \vee (m_{1,k} = 6)) \wedge (l_1 \vee (m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5) \vee \\
 & \quad \vee ((m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7)) \wedge ((m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8))) \vee
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \vee ((m_{1,k} = 3) \vee (m_{1,k} = 7)) \wedge (l_1 \vee (m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8) \vee \\ & \quad \vee ((m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5)) \wedge ((m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6))) \vee \\ & \vee ((m_{1,k} = 4) \vee (m_{1,k} = 8)) \wedge (l_1 \vee (m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7) \vee \\ & \quad \vee ((m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5)) \wedge ((m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6))), \end{aligned}$$

де  $l_1 = (m_{1,k+l} = 9) \vee (m_{1,k+l} = 10) \vee (m_{1,k+l} = 11) \vee (m_{1,k+l} = 12)$ .

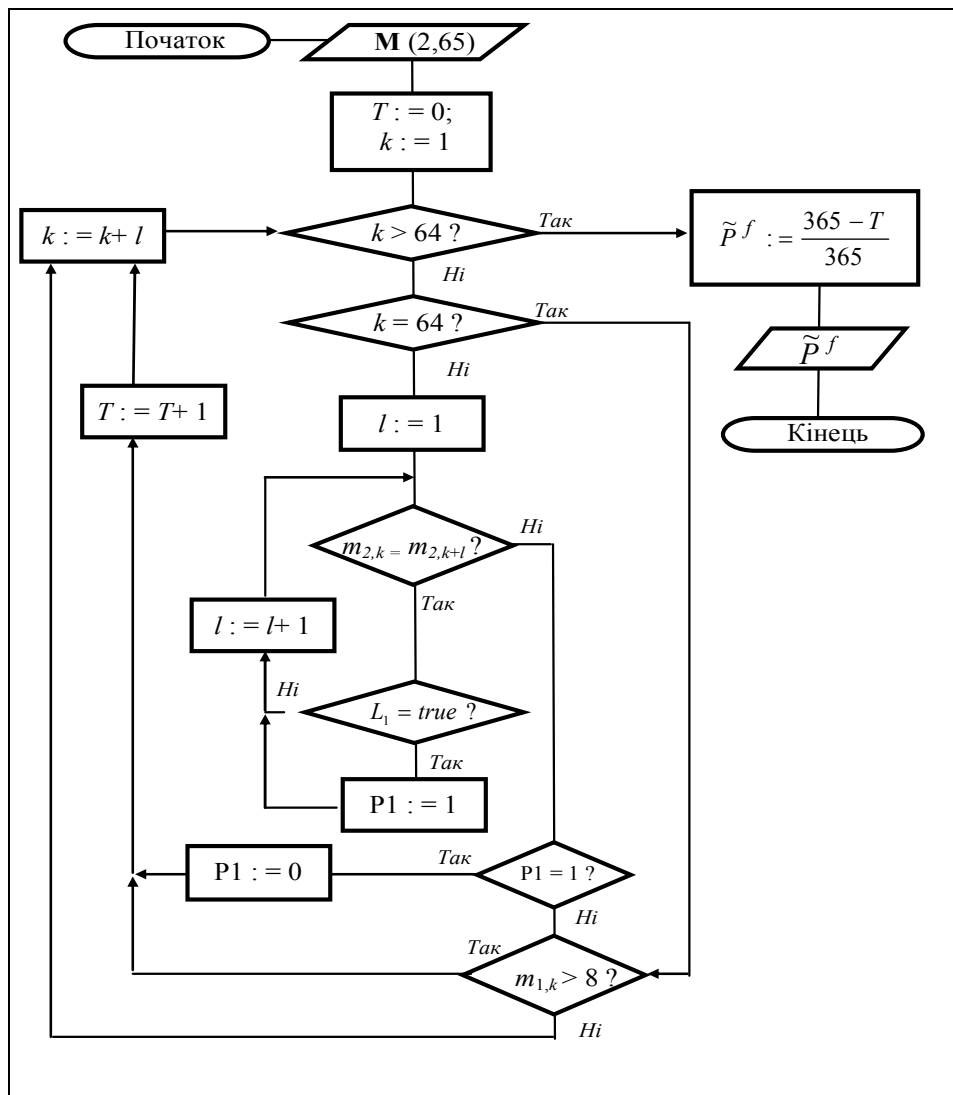


Рис. 6.15 – Схема алгоритму розрахунку  $\tilde{P}^{f_1}$  за даними масиву **М**

Одноразове виконання програми за цим алгоритмом дає випадкове значення показника функціональної надійності  $\tilde{P}^{f_1}$ .

Відповідно до останньої процедури п.17  $n$ -разове виконання програми та визначення середнього значення показника  $P_{\text{ср.}}^{f_1}$  за формулою (5.1) дозволяє побачити тенденцію зміни  $P_{\text{ср.}}^{f_1}$  залежно від величини  $n$ .

Результати обчислювального експерименту за викладеним алгоритмом подані у вигляді табл. 6.7 і діаграми на рис. 6.16.

Таблиця 6.7 – Результати обчислювального експерименту ОЕ-2

Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$
1	0,967123	0,967123
2	0,972603	0,969863
3	0,972603	0,970776
4	0,964384	0,969178
5	0,961644	0,967671
6	0,972603	0,968493
7	0,956164	0,966732
8	0,975342	0,967808
9	0,950685	0,965906
10	0,964384	0,965753
20	0,967123	0,964795
30	0,969863	0,965571
40	0,967123	0,964863
50	0,964384	0,965205
60	0,956164	0,965023
70	0,964384	0,965479
80	0,967123	0,965514
90	0,969863	0,965693
100	0,956164	0,965616
200	0,967123	0,965795
300	0,969863	0,965616
400	0,956164	0,965623
500	0,950685	0,965452

Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$
600	0,967123	0,965388
700	0,967123	0,965198
800	0,961644	0,965257
900	0,964384	0,965196
1000	0,956164	0,965214
1100	0,975342	0,965275
1200	0,953425	0,965279
1300	0,980822	0,965338
1400	0,980822	0,96526
1500	0,967123	0,96514
1600	0,964384	0,965139
1700	0,961644	0,965189
1800	0,961644	0,965108
1900	0,964384	0,965045
2000	0,967123	0,964974
3000	0,961644	0,964962
4000	0,972603	0,964993
5000	0,956164	0,964996
6000	0,967123	0,965065
7000	0,956164	0,965081
8000	0,964384	0,965073
9000	0,961644	0,965082
10000	0,975342	0,965133



Дані в табл. 6.7 і діаграма залежності  $P_{\text{ср}}^{f_1}$  від числа експериментів  $n$  на рис. 6.16 свідчать про адекватність математичної моделі (6.8).

Аналогічні обчислювальні експерименти з перевірки адекватності були проведені для математичних моделей (6.9) і (6.10).

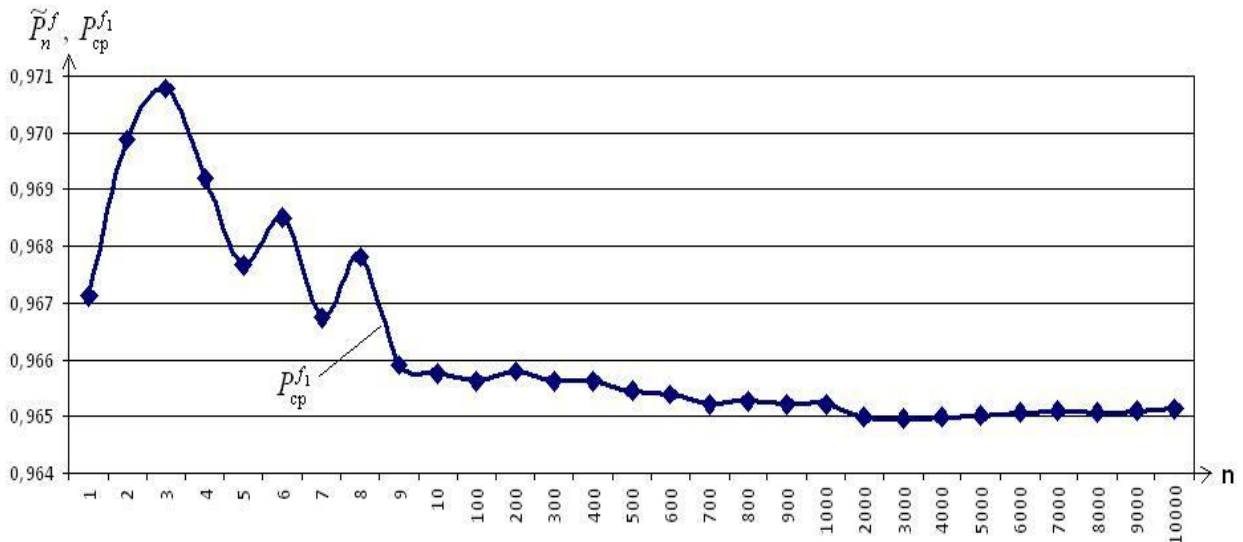


Рис. 6.16 – Діаграма  $P_{\text{ср}}^{f_1}$  залежно від кількості експериментів  $n$

Схема алгоритму обчислювального експерименту для моделі (6.9), як і його результати у вигляді таблиці й діаграми, наведені в Додатку Е «Обчислювальний експеримент ОЕ-3»; для моделі (6.10) – в Додатку Г «Обчислювальний експеримент ОЕ-4».

Таблиці результатів експериментів і відповідні діаграми в додатках свідчать про адекватність моделей (6.9) і (6.10). Незначні відхилення результатів експерименту від розрахункових значень пояснюються вимушеним округленням числа відмов на запірній арматурі до цілої величини. Для забезпечення повного збігу результатів розрахунку і експерименту необхідно так підбирати параметри системи, що беруть участь у визначенні числа відмов, щоб процедура округлення була відсутня.

Проведення обчислювальних експериментів з перевірки адекватності математичних моделей, отриманих методом АРЗ, переконливо підтверджує теоретичну спроможність самого методу АРЗ й правомірність його використання для отримання адекватних математичних моделей функціональної надійності трубопровідних систем будь-якої складності.

## *Післямова*

Ця монографія є одним із результатів науково-дослідної роботи, що проводиться авторами відповідно до завдань «Цільової комплексної програми розвитку транспортного комплексу України «Транспорт» (1992–2010 г.г.) і «Загальнодержавної програми реформування і розвитку житлово-комунального господарства на 2004–2010 р.р.», затвердженої Законом України від 24.06.2004 року №1869–IV.

Інформаційною базою, на яку спираються дослідження авторів є роботи співробітників кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Харківської національної академії міського господарства, насамперед, це дисертаційні дослідження І. О. Гавриленко, О. Б. Костенка, І. О. Рудя, О. В. Лобан та Т.С. Сенчук під керівництвом і з безпосередньою участю М. І. Самойленка.

Основними науковими результатами монографії є:

- удосконалення 7-етапного аналітичного методу АРЗ для побудови математичної моделі показника функціональної надійності (ймовірності безперервного постачання цільового продукту) трубопровідної мережі стосовно конкретного споживача, що виявляється в окремих змінах процедур 5-го та 6-го етапів (див. підрозділи 2.5 и 2.6);
- доведення спроможності методу АРЗ для розрахунку показника функціональної надійності шляхом віртуальної побудови трубопровідних систем і перевірці статистичними методами результатів розрахунків за математичними моделями, що отримують аналітичним методом АРЗ (розділи 5 і 6);
- узагальнення методу АРЗ на розподільні трубопровідні мережі з мостовою структурою трубопроводів (підрозділ 6.4);
- розробка першого модифікованого методу АРЗ для оцінки зверху й знизу функціональної надійності магістральних систем з двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою (підрозділ 4.3);
- розробка другого модифікованого методу АРЗ для оцінки знизу функціональної надійності магістральних систем з двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою (підрозділ 4.4).

Основні практичні результати:

- розробка універсальної методики перевірки адекватності математичних моделей для розрахунку ймовірності безперебійного постачання цільового продукту споживачам для систем зі складною структурою і різномірним складом трубопровідної мережі;

- розробка спрощеної методики перевірки адекватності аналітичних моделей для розрахунку ймовірності безперебійного постачання цільового продукту споживачам для простих трубопровідних систем.

Практичне значення проведеного дослідження полягає в тому, що:

- конструктори і проектувальники отримують інструмент для створення, реконструкції і розвитку складних трубопровідних систем (водопровідних, теплових, газових та ін.) з високою функціональною надійністю;

- експлуатаційники трубопровідних систем отримують інструмент для визначення вузьких місць, тобто ділянок або цілих зон трубопровідної мережі з недостатньою функціональною надійністю;

- споживачі мережі отримують критерій, що дозволяє визначати надійність постачання цільового продукту й місця підключення до трубопровідної мережі з найменшим ризиком переривання постачання.

Безумовно, проведені дослідження не вичерпують всього комплексу завдань, вирішення яких необхідне для остаточного формування загальної теорії функціональної надійності трубопровідних систем. До невирішених або частково вирішених завдань треба віднести:

- узагальнення методу АРЗ на розрахунок функціональної надійності трубопровідної системи з двома і більш джерелами ЦП;

- визначення граничне допустимих параметрів трубопровідних систем при заданих ресурсах і умовах, зокрема – оптимальної кількості перемичок в магістральних системах;

- цифрове моделювання методу АРЗ та ін.

Розробка загальної теорії функціональної надійності надає обширне поле діяльності для вчених і виробників. Тільки аналітичний «урожай» з цього поля дозволить автоматизувати процеси проектування, експлуатації і розвитку трубопровідних систем з урахуванням їх функціональної надійності.

Загальна теорія функціональної надійності чекає своїх дослідників, і перш за все – молодих!

*Проф., д-р техн. наук М.І. Самойленко*

## СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

**арматура трубопровідна** – допоміжні пристрої трубопроводів, які поділяються залежно від призначення на запірну (крани, засувки), запобіжну (клапани), регулюючу (вентилі, регулятори тиску), відведення (відводи повітря, конденсату), аварійна (сигнальні гудки) та ін. [4, т.2, с.209] ;

**безвідмовність** – властивість системи безперервна зберігати *працездатність* [4, т.3, с.854] ;

**велика система** – керована система, що розглядається як сукупність взаємозв'язаних керованих підсистем, об'єднаних загальною метою функціонування [4, т.3, с.531] ;

**відмова** – поступова або раптова втрата пристроєм *працездатності* [30, т.3, с.854] ;

**відновлюваність** – властивість системи або елемента повертати втрачені технічні характеристики, визначається періодом відновлення або функцією розподілу часу відновлення [34, с.145] ;

**водовод** – водопровідна споруда для пропуску (подачі) води самопливом або під натиском до місця її споживання; один з основних елементів системи водопостачання [4, т.5, с.184] ;

**водопровідна мережа** – сукупність водопровідних ліній (трубопроводів) для подачі води до місць споживання [4, т.5, с.192] ;

**ймовірність** – можливість здійснення чого-небудь [34, с.65] ;

**ймовірність мат.** – числова характеристика ступеня можливості появи якої-небудь певної події в тих або інших конкретних умовах, таких що можуть повторюватися необмежене число разів [30, т.3, с.854] ;

**ймовірність безвідмовної роботи  $R(t)$**  – найважливіший кількісний показник *надійності*, рівний *ймовірності* того, що за час  $t$  система не досягне стану відмови [30, т.3, с.854] ;

**газова мережа** – система трубопроводів (газопроводів), що призначена для транспортування горючих газів і розподілу їх між споживачами; основний елемент системи газопостачання населеного пункту [4, т.6, с.13] ;

**гамма-відсотковий ресурс** – час, протягом якого труба досягає граничного стану із заданою вірогідністю  $\gamma$  [33, с.144] ;

**гідравлічний транспорт** – спосіб переміщення твердих матеріалів потоком води [4, т.6, с.468] ;

**довговічність** – властивість технічної системи безперервна зберігати *працездатність* з необхідними перервами для ремонтів і технічного обслуговування за умови економічної доцільності подальшої експлуатації [30, т.3, с.854] ;

**Кірхгофа перше правило** – струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю, якщо вважати струми, що підходять до вузла, позитивними, а що відходять – від’ємними [24, с.201] ;

**Кірхгофа друге правило** – алгебраїчна сума добутків струмів на опори (включаючи й внутрішній опір) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють в замкнутому контурі. При цьому і струми, і електрорушійні сили, що співпадають з довільно вибраним напрямом обходу контуру, вважаються позитивними, а направлені назустріч обходу – від’ємними [24, с.201] ;

**магістраль** (від латів. *magistralis* – керівний) – головний напрям, основна лінія в шляхах сполучення; широка вулиця великого міста з інтенсивним рухом; головний кабель, дріт в електричних мережах, в телеграфному та телефонному зв'язку; головна труба в каналізаційній або водопровідній мережі [4, т.15, с.151] ;

**магістральний канал** – головний розподільний канал в зрошувальній мережі або основний провідний канал в осушній мережі [4, т.15, с.151] ;

**магістральний нафтопровід** – нафтопровід, призначений для транспортування нафти на значні відстані, нерідко до 2000 км. та більше [4, т.17, с.531] ;

**магістральний продуктопровід** – магістральний трубопровід, призначений для переміщення готових нафтопродуктів із заводів в райони споживання [4, т.26, с.261] ;

**магістральний трубопровідний транспорт** – тип *трубопровідного транспорту*, що здійснює транспорт продукту від місця здобичі до місць переробки та споживання [4, т.26, с.261] ;

**мережа** – система шляхів, ліній, розташованих на якому-небудь просторі [34, с.621] ;

**надійність** – поняття, що поєднує поняття *безвідмовності*, *довговічності*, *приспосованості до ремонту* [30, т.3, с.854] ;

**надійність виробу** – властивість виробу зберігати значення встановлених параметрів функціонування в певних межах, відповідних заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Надійність – комплексна властивість, яка

залежно від призначення виробу та умов його експлуатації може поєднувати властивості *безвідмовності, довговічності, ремонтпристосованості та сохрності* окремо або у певному поєднанні цих властивостей як виробу в цілому, так і його частин [4, т.17, с.205] ;

**надійність кібернетичної системи** – здатність систем зберігати свої найбільш суттєві властивості (безвідмовність, ремонтпридатність і ін.) на заданому рівні протягом фіксованого проміжку часу за певних умов експлуатації [53, т.2, с.60] ;

**нафтопровід** – комплекс споруд для транспортування нафти і продуктів її переробки від місця їх здобичі або виробництва до пунктів споживання або перевалювання на залізничний або водний транспорт [4, т.17, с.531] ;

**нафтопродуктопровід** – комплекс споруд для транспортування продуктів переробки нафти від місця їх здобичі або виробництва до пунктів споживання або перевалювання на залізничний або водний транспорт [4, т.17, с.531] ;

**оптимальне резервування** – одна з екстремальних задач в теорії надійності [30, т.3, с.856] ;

**пневматичний транспорт** – вид *трубопровідного промислового транспорту*, що є сукупністю установок і систем для переміщення сипких і штучних вантажів за допомогою повітря або газу [4, т.20, с.61]

**пневмокапсульний транспорт** – вид *пневматичного транспорту*, призначений для переміщення штучних вантажів в контейнерах (капсулах) на значні відстані під дією перепаду тиску повітря в трубопроводі [4, т.20, с.62] ;

**працездатність** – здатність багато і продуктивно працювати [34, с.553] ;

**працездатність** – стан виробу, при якому воно відповідає всім вимогам, що пред'являються до його основних параметрів [4, т.17, с.205] ;

**призначений ресурс трубопроводу** – час роботи *трубопроводу*, після якого його експлуатація повинна бути припинена незалежно від її стану та поставлена на *санацію* [33, с.144] ;

**промисловий трубопровідний транспорт** – вид *трубопровідного транспорту*, що здійснює транспортування вантажів по трубах в межах виробничого підприємства для продовження технологічного процесу [4, т.26, с.261] ;

**резервування** – метод підвищення *надійності* шляхом введення надмірності того або іншого роду [29, т.3, с.855] ;

**ремонтпридатність** – властивість мережі або її елементів, що характеризує їх пристосованість до відновлення та і збереження заданої технічної характеристики [33, с.145] ;

**ремонтпристосованість** – властивість системи, що визначає зручність її технічного обслуговування і проведення ремонтних робіт [29, т.3, с.854] ;

**ремонтпристосованість аварійно-ремонтної зони** – якісний показник (так, ні), що визначає властивість трубопровідної мережі здійснювати ремонтно-профілактичні роботи в даній зоні без переривання постачання цільового продукту всім споживачам мережі (*авторське визначення*) ;

**ремонтпристосованість трубопровідної мережі** – якісний показник (так, ні), що визначає властивість трубопровідної мережі здійснювати ремонтно-профілактичні роботи без переривання постачання цільового продукту всім споживачам мережі (*авторське визначення*) ;

**санация** (лат. sanatio – лікування, оздоровлення) – система заходів щодо відновлення фізично зношених технічних об'єктів, у тому числі трубопроводів [33, с.621] ;

**середній ресурс** – математичне сподівання ресурсу, тобто середня тривалість роботи труби до певного стану або між капітальним і середнім ремонтами [33, с.144] ;

**складна технічна система** – технічна система, що складається з конструктивно незалежних вузлів, володіє здатністю перебудовувати свою структуру для збереження працездатності при відмові окремих частин і що має два і більш працездатних стани [4, т.17, с.206] ;

**сохраність** – властивість виробу, пристрої, споруди безперервно зберігати (у заданих межах) значення встановлених для них показників якості під час і після схову та транспортування [4, т.24, с.216] ;

**структура** – взаємне розташування частин, що складають одне ціле [51, с.477] ;

**ступінь резервування постачання** – кількість непересічних маршрутів постачання цільового продукту від джерела (джерел) конкретному споживачеві (*авторське визначення*) ;

**ступінь ремонтпристосованості** – відносний показник ремонтпристосованості системи, визначуваний як відношення числа ремонтпристосованих елементів мережі до загального числа елементів (*авторське визначення*) ;

**сумарна ймовірність працездатності системи** – один з можливих показників надійності *складної технічної системи*, що дорівнює сумі ймовірностей всіх працездатних станів системи [4, т.17, с.206] ;

**теплова мережа** – система *трубопроводів* (теплопроводів) для транспортування та розподілу теплоносія (гарячої води або пару) при централізованому теплопостачанні. Розрізняють магістральні і розподільні мережі [4, т.25, с.443] ;

**топографія** – поверхня якої-небудь місцевості; взаємне розташування її пунктів, частин [51, с.500] ;

**транспорт** – галузь матеріального виробництва, що пов'язана з переміщенням людей і вантажів [4, т.26, с.154] ;

**транспортні мережі** – трубопровідний транспорт в межах нафтобазових, внутрішньопромислових (нафто-, газо- і продуктопроводів) і міських комунальних мереж, галузь матеріального виробництва, що пов'язана з переміщенням людей і вантажів [4, т.26, с.154] ;

**трубопровід** – споруда для транспортування газоподібних і рідких речовин, твердого палива, будівельних матеріалів, зерна та ін. під впливом різниці тиску (напору) в різних перетинах [4, т.26, с.260] ;

**трубопровідний транспорт** – вид транспорту, що здійснює передачу на відстань рідких, газоподібних і твердих продуктів у *трубопроводах* [4, т.27, с.260–261] ;

**функціональна надійність системи** – ймовірність виконання функціональної задачі системи протягом певного періоду часу  $T$ ;

**функціональна надійність трубопровідної транспортної системи** – ймовірність безперебійного постачання цільового продукту споживачеві протягом певного періоду часу ;

**функція інтенсивності відмови  $\lambda(t)$**  – умовна щільність розподілу *відмови* за умови, що технічна система пропрацювала безвідмовно протягом часу  $t$ . Якщо існує щільність розподілу, то  $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$  [30, т.3, с.854–855] ;

**функція розподілу настання відмови  $F(t)$  до моменту  $t$**  – різниця між одиницею та *ймовірністю безвідмовної роботи*, тобто  $1-R(t)$  [29, т.3, с.854] ;

**цільовий продукт** – продукт, що транспортується споживачеві у *трубопроводі*. Як цільовий продукт можна вважати природний газ, воду, нафту, стисле повітря, тепло та т.п.



## ДОДАТКИ

### Додаток А. Ліміти відносного підвищення функціональної надійності системи за рахунок резервування

#### А.1. Верхня границя

При багатократному резервуванні з низькою технічною надійністю трубопроводу ( $p \approx 0$ ) граничне підвищення функціональної надійності системи складає

$$\begin{aligned}\lim_{p \rightarrow 0} \frac{P_n^f}{p} &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = \\&= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - [1 - C_n^1 p + C_n^2 p^2 - \dots + (-1)^k C_n^k p^k + \dots + (-1)^n C_n^n p^n]}{p} = \\&= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - [1 - C_n^1 p + C_n^2 p^2 - \dots + (-1)^k C_n^k p^k + \dots + (-1)^n C_n^n p^n]}{p} = \\&= \lim_{p \rightarrow 0} [C_n^1 + C_n^2 p - \dots + (-1)^k C_n^k p^{k-1} + \dots + (-1)^n p^{n-1}] = C_n^1 = n.\end{aligned}$$

#### А.2. Нижня границя

При багатократному резервуванні з високою технічною надійністю трубопроводу ( $p \approx 1$ ) граничне підвищення функціональної надійності системи складе

$$\lim_{p \rightarrow 1} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 1} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = \frac{1 - (1 - 1)^n}{1} = 1.$$

Таким чином, при високій надійності трубопроводу без резервування ( $p \approx 1$ ) ефект підвищення функціональної надійності системи за рахунок резервування повністю відсутній.

## Додаток В. Максимальне абсолютне підвищення функціональної надійності системи за рахунок резервування

Максимальне абсолютне підвищення функціональної надійності системи за рахунок резервування знаходиться за допомогою вирішення задачі математичного програмування, в якій цільовою функцією виступає різниця

$$P_n^f - p,$$

де  $P_n^f$  – функція, що визначає функціональну надійність системи при  $(n-1)$ -кратному резервуванні магістрального трубопроводу;  $p$  – змінна, що визначає функціональну надійність трубопроводу до резервування і дорівнює ймовірності безвідмовної роботи трубопроводу на протязі певного періоду часу;  $n$  – константа, що дорівнює кількості паралельних трубопроводів в системі з резервуванням.

На змінну  $p$ , оскільки вона є ймовірністю відмови трубопроводу за певний період часу (календарний рік, період між проведеннями профілактичних робіт, період напрацювання на відмову та ін.), накладається двостороннє обмеження

$$0 \leq p \leq 1.$$

Таким чином, дане завдання математичного програмування є завданням одновимірної оптимізації при двосторонній обмеженості змінною, математична модель якої має вигляд

$$P_n^f - p \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}. \quad (B.1)$$

У загальному випадку задача (B.1) вирішується тільки прямими методами. Оскільки шукане рішення, як буде показано нижче, знаходиться всередині області допустимих рішень, тобто всередині відрізка  $[0, 1]$ , то воно може бути знайдене за допомогою методу Ейлера для вирішення задач безумовної оптимізації.

При визначенні функції  $P_n^f$  в нижченаведених моделях оптимізаційних задач передбачається, що кожен резервний трубопровід має технічну надійність, що дорівнює  $p$ , тобто він є абсолютно ідентичним резервованому трубопроводу як за виконанням, так і за умовами й терміном експлуатації.

*Примітка.* Число трубопроводів  $n$  на одиницю більше кратності резервування.

### В.1. Просте резервування

При одноразовому резервуванні математична модель оптимізаційної задачі – задачі пошуку максимального абсолютного збільшення функціональної надійності за рахунок резервування, має вигляд

$$(P_2^f - p) = [1 - (1 - p)^2] - p = p - p^2 \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}. \quad (\text{В.2})$$

Єдину стаціонарну точку  $p_0 = 0,5$  знаходимо з рівності

$$\frac{d(p - p^2)}{dp} = 1 - 2p = 0.$$

Знайдена стаціонарна точка цільової функції лежить усередині області допустимих рішень.

Від'ємність другої похідної цільової функції

$$\frac{d^2(p - p^2)}{dp^2} = -2 < 0$$

свідчить про наявність максимуму в стаціонарній крапці.

Таким чином, маємо рішення задачі (В.2), не вдаючись до прямих методів вирішення:

$$p_2^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_2^f - p) \right] = 0,5.$$

При цьому максимальне абсолютне збільшення функціональної надійності системи становить

$$(P_2^f - p)^* = 0,25.$$

### В.2. Подвійне резервування

При двократному резервуванні математична модель задачі пошуку максимального абсолютного збільшення функціональної надійності за рахунок резервування, має вигляд

$$(P_3^f - p) = [1 - (1 - p)^3] - p = p^3 - 3p^2 + 2p \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}. \quad (\text{В.3})$$

Необхідна умова для визначення стаціонарних точок

$$\frac{d(p^3 - 3p^2 + 2p)}{dp} = 3p^2 - 6p + 2 = 0.$$

Цільова функція має дві стаціонарні точки  $p_{01} \approx 0,4227$  і  $p_{02} \approx 1,5774$ .

Єдина припустима стаціонарна точка  $p_{01} = 0,4227$  є точкою максимуму, тому що

$$\left. \frac{d^2(p^3 - 3p^2 + 2p)}{dp^2} \right|_{p_{01} \approx 0,4227} = -6 + 6p < 0.$$

Таким чином, маємо рішення задачі (В.3)

$$p_3^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_3^f - p) \right] \approx 0,4227.$$

Максимальне абсолютне збільшення функціональної надійності системи становить

$$(P_3^f - p)^* \approx 0,385.$$

### В.3. Потрійне резервування

При триразовому резервуванні математична модель оптимізаційної задачі на відшукування максимального абсолютного збільшення функціональної надійності набуде вигляду:

$$(P_4^f - p) = [1 - (1 - p)^4] - p = -p^4 + 4p^3 - 6p^2 + 3p \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}.$$

(В.4)

Необхідна умова для визначення стаціонарних точок:

$$\frac{d(3p - 6p^2 + 4p^3 - p^4)}{dp} = -4p^3 + 12p^2 - 12p + 3 = 0.$$

Отримане рівняння  $-4p^3 + 12p^2 - 12p + 3 = 0$  розділимо на 4 і введемо нову змінну  $x = p - 1$ . Нове рівняння

$$x^3 + 0,25 = 0$$

має три однакові дійсні корені уявних.  $x_{01} = x_{02} = x_{03} \approx -0,63$ . Повертаючись до початкової змінної, маємо  $p_{01} = p_{02} = p_{03} = x + 1 = 0,37$ . Отже, цільова функція (В.4) має єдину допустиму стаціонарну точку  $p_0 = 0,37$ . При цьому в стаціонарній точці цільова функція досягає свого максимуму, оскільки

$$\left. \frac{d^2(3p - 6p^2 + 4p^3 - p^4)}{dp^2} \right|_{p_{01}=0,37} = -12 + 24p - 12p^2 = -12(1 - p)^2 < 0.$$

Таким чином, рішенням задачі (В.4) є величина

$$p_4^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_4^f - p) \right] = 0,37.$$

Максимальне абсолютне збільшення функціональної надійності системи становить

$$(P_4^f - p)^* \approx 0,4725.$$

## Додаток С. Побудова математичних моделей функціональної надійності магістральної системи з однією перемичкою

Побудова математичних моделей для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з однією перемичкою типу *A*, *C*, *D*, *G*, *F*, *L* або *M* проводиться за методом АРЗ, викладеним в [44]. Розбиття системи на аварійно-ремонтні зони (АРЗ) здійснюється за алгоритмом, викладеним в [55].

### С.1. Перемичка А-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою А-типу (без засувки) зображений на рис. С.1.

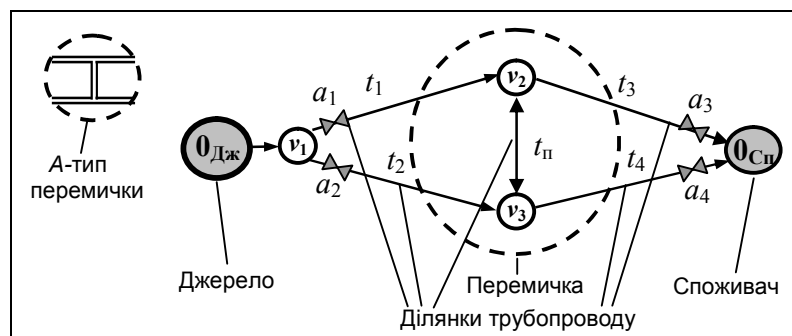


Рис. С.1 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою А-типу

Щоб початковий граф системи (рис. С.1) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра, відповідного перемичці, встановити значення вагової функції  $z_{23}$  рівним 0 (засувки на ділянці  $t_{\Pi}$  відсутні). Результати розбиття відображені в табл. С.1.

Таблиця С.1 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2}(t_1), e_{1,3}(t_2), e_{2,0_{\text{Сп}}}(t_3), e_{3,0_{\text{Сп}}}(t_4), e_{2,3}(t_{\Pi})$	$a_1, a_2, a_3, a_4$	$v_2, v_3$
2	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.2.

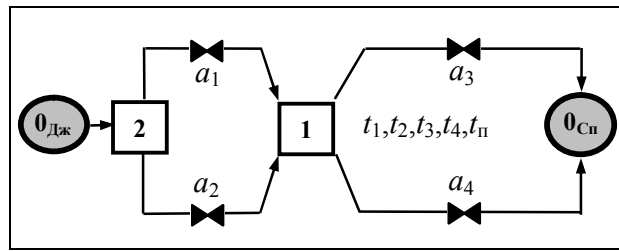


Рис. С.2 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою А-типу

Нехай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,2}$ ;  $p_{ai}$  – технічна надійність  $i$ -ї засувки,  $i = \overline{1,4}$ . Тоді розрахункова модель функціональної надійності системи має вигляд, показаний на рис. С.3.

Послідовний тип розрахункової моделі пояснюється тим, що транспорт ЦП здійснюватиметься тільки за умови одночасної працездатності всіх елементів транспортної мережі.

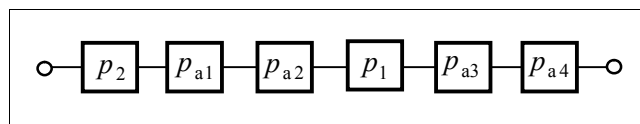


Рис. С.3 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою А-типу

Шукана функціональна надійність всієї системи, згідно з розрахунковою моделлю (рис. С.3), відповідає виразу

$$P_{2+п0,A}^f = p_2 p_{a1} p_{a2} p_1 p_{a3} p_{a4}. \quad (C.1)$$

Технічною ненадійністю АРЗ №2 через порівняно невелику сумарну довжину трубопровідних ділянок (в порівнянні з АРЗ №1) можна знехтувати, тобто припустити  $p_2 = 1$ . Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних

періодів часу, то можна вважати, що  $p_{ai} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ . З урахуванням зроблених зауважень вираз (С.1) набуває вигляду

$$P_{2+п0,A}^f = p_a^4 p_1. \quad (C.2)$$

Якщо вважати, що технічна надійність засувки  $p_a$  значно перевершує надійність протяжних трубопроводів АРЗ №1, тобто покласти  $p_a = 1$ , то вираз (С.2) трансформується в просту формулу

$$P_{2+п0,A}^f = p_1. \quad (C.3)$$

Для порівняльного аналізу функціональної надійності  $P_{2+п0,A}^f$  системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою А-типу (рис. С.1), і функціональної надійності тієї ж системи без перемички (рис. 3.3) або сполучених перемичкою іншого типу, необхідно виразити  $p_1$  через технічну надійність  $p$  (імовірність безвідмовної роботи кожного з двох паралельних трубопроводів у системі на рис. 3.3).

Сумарна довжина трубопроводних ділянок АРЗ №1 у 2 рази більше довжини кожного з двох паралельних трубопроводів в системі на рис. 3.3. Тому частота відмов (ненадійність) в АРЗ №1 буде в 2 рази більше частоти відмов трубопроводу:

$$(1 - p_1) = 2(1 - p). \quad (C.4)$$

Звідси

$$p_1 = 2p - 1. \quad (C.5)$$

Підставляючи (С.5) в (С.2), маємо

$$P_{2+п0}^f = p_a^4 (2p - 1). \quad (C.6)$$

Вираз (С.6) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою А-типу (рис. С.1). При абсолютній надійності засувки математична модель спрощується:

$$P_{2+п0}^f = 2p - 1. \quad (C.7)$$

Тут, як і в (С.6), – вірогідність безвідмовної роботи кожного з двох паралельних трубопроводів у системі на рис. 3.3.



## С.2. Перемичка С-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою С-типу (одна несиметрично встановлена засувка) зображений на рис. С.4.

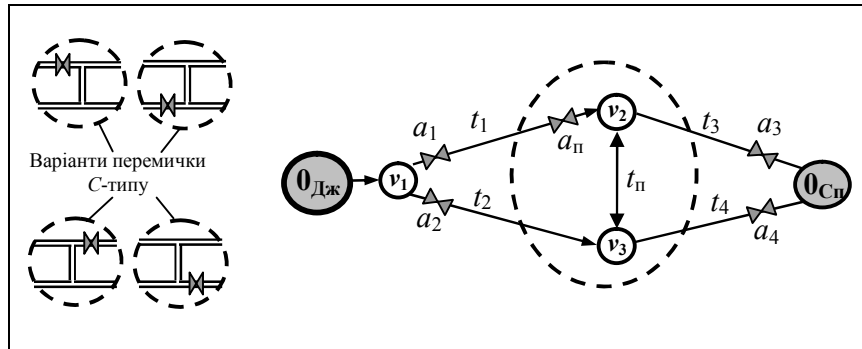


Рис. С.4 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою С-типу

Щоб початковий граф системи (рис. С.4) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра  $t_{\text{п}}$ , відповідній перемичці, встановити значення вагової функції  $z_{23}$  рівним 0 (засувки на ділянці  $t_{\text{п}}$  відсутні). Результати розбиття відображені в табл. С.2.

Таблиця С.2 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2}(t_1)$	$a_1, a_{\text{п}}$	—
2	$e_{1,3}(t_2), e_{2,0_{\text{Сп}}}(t_3),$ $e_{3,0_{\text{Сп}}}(t_4), e_{2,3}(t_{\text{п}})$	$a_2, a_3, a_4, a_{\text{п}}$	$v_2, v_3$
3	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.5.

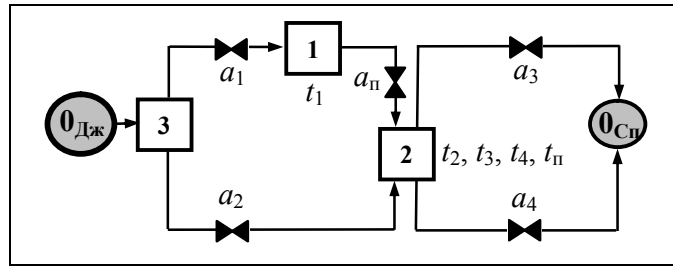


Рис. С.5 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою С-типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,3}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{\pi}$  – технічні надійність центральної засувки, що належить перемичці. Тоді розрахункова модель функціональної надійності системи має вигляд, показаний на рис. С.6.

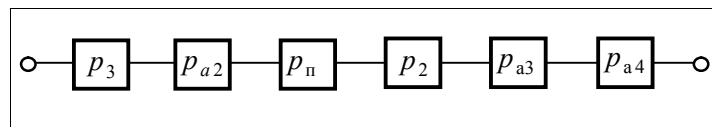


Рис. С.6 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою С-типу

Постачання ЦП споживачеві в системі з перемичкою С-типу можлива тільки за умови працездатності всіх елементів системи, окрім трубопроводів АРЗ №1 і засувки  $a_1$ . Надійність зони №1 і засувки  $a_1$  на функціональну надійність системи не впливає.

Шукана функціональна надійність всієї системи, згідно з розрахунковою моделлю (рис. С.6), відповідає виразу

$$P_{2+\pi 1, C}^f = p_3 p_{a2} p_{\pi} p_2 p_{a3} p_{a4}. \quad (C.8)$$

Технічною ненадійністю АРЗ №3 через порівняно невелику сумарну довжину трубопровідних ділянок (в порівнянні з АРЗ №2) можна знехтувати, тобто покласти  $p_3 = 1$ . Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{ai} = p_{\pi} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ . З урахуванням зроблених зауважень (С.8) набуде вигляду

$$P_{2+n1,C}^f = p_a^4 p_2. \quad (C.9)$$

Сумарна довжина трубопроводних ділянок АРЗ №2 у півтора рази більше довжини кожного з двох паралельних трубопроводів у системі на рис. 3.3. Тому частота відмов (ненадійність) в АРЗ №2 буде в 1,5 разу більше частоти відмов трубопроводу:

$$(1 - p_2) = \frac{3}{2}(1 - p). \quad (C.10)$$

Звідси

$$p_2 = \frac{1}{2}(3p - 1). \quad (C.11)$$

Підставляючи (C.11) в (C.9), маємо

$$P_{2+n1,C}^f = \frac{1}{2} p_a^4 (3p - 1). \quad (C.12)$$

Вираз (C.12) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою С-типу. При абсолютній надійності засувки ( $p_a = 1$ ) математична модель спрощується:

$$P_{2+n1,C}^f = \frac{1}{2}(3p - 1). \quad (C.13)$$

### С.3. Перемичка Е-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою Е-типу (дві засувки в перемичці по одній на входних  $t_1$  і  $t_2$  або вихідних  $t_3$  та  $t_4$  трубопроводах) зображений на рис. С.7.

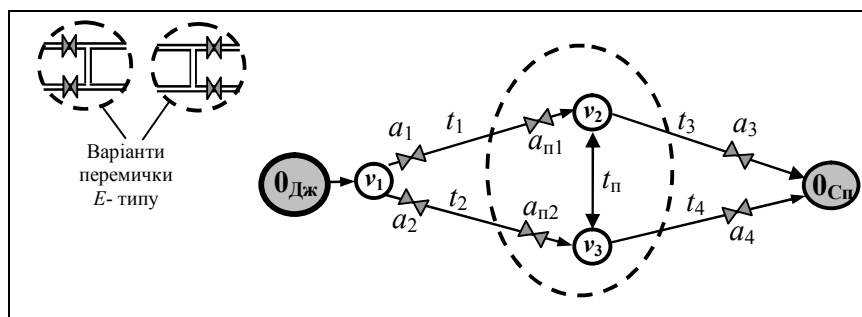


Рис. С.7 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою Е-типу

Щоб початковий граф системи (рис. С.7) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра, відповідного перемичці ( $t_{\text{п}}$ ), встановити значення вагової функції  $z_{23}$  рівним 0 (засувки на ділянці  $t_{\text{п}}$  відсутні). Результати розбиття відображені в табл. С.3.

Таблиця С.3 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2}(t_1)$	$a_1, a_{\text{п1}}$	—
2	$e_{1,3}(t_2)$	$a_2, a_{\text{п2}}$	—
3	$e_{2,0_{\text{Сп}}}(t_3)$ , $e_{3,0_{\text{Сп}}}(t_4)$ , $e_{2,3}(t_{\text{п}})$	$a_{\text{п1}}, a_{\text{п2}}, a_3, a_4$	$v_2, v_3$
4	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.8.

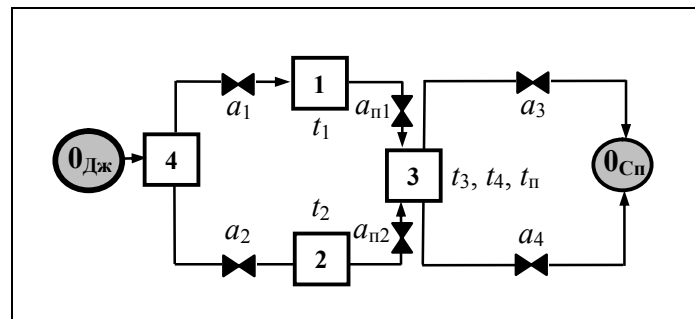


Рис. С.8 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою E-типу

Нехай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{\text{пк}}$  – технічна надійність засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,2}$ . Тоді розрахункова модель функціональної надійності системи має вигляд, показаний на рис. С.9.

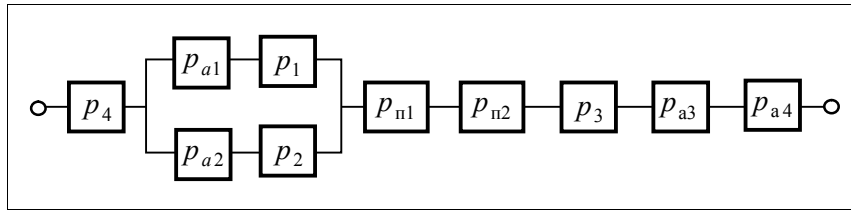


Рис. С.9 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $E$ -типу

Постачання ЦП споживачеві в системі з перемичкою  $E$ -типу можлива, якщо хоч би одна один із ланцюжків «засувка  $a_1$  + АРЗ №1» і «засувка  $a_2$  + АРЗ №2» знаходиться в справному стані. Тому в розрахунковій схемі на рис. С.9 їм відповідає паралельна модель надійності. Якщо тільки обидві зони виявляться непрацездатними або відмовить будь-який інший елемент мережі, то в цьому випадку транспорт ЦП споживачеві буде припинений. Надійність постачання ЦП через ці елементи відповідає моделі на рис. С.9.

Шукана функціональна надійність всієї системи, згідно з розрахунковою моделлю (рис. С.9), визначається виразом

$$P_{2+n2,E}^f = p_4 [1 - (1 - p_{a1} p_1)(1 - p_2 p_{a2})] p_{n1} p_{n2} p_3 p_{a3} p_{a4}. \quad (\text{С.14})$$

Технічною ненадійністю АРЗ №4 через порівняно невелику сумарну довжину трубопровідних ділянок (у порівнянні з АРЗ №1, №2 або №3) можна знехтувати, тобто покласти  $p_4 = 1$ . Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{aj} = p_{nk} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $k \in \overline{1,2}$ . З урахуванням зроблених зауважень вираз (С.14) набуває вигляду

$$P_{2+n2,E}^f = p_a^4 [1 - (1 - p_a p_1)(1 - p_a p_2)] p_3. \quad (\text{С.15})$$

Сумарна довжини трубопровідних ділянок АРЗ №3 дорівнює довжині кожного з двох паралельних трубопроводів в системі на рис. 3.3, тобто  $p_3 = p$ . Сумарні довжини трубопровідних ділянок АРЗ №1 і №2 дорівнюють одна одній і в 2 рази коротше за довжину кожного з двох паралельних трубопроводів в системі на рис. 3.3. Тому частота відмов (ненадійність) в АРЗ №1 або №2 буде в 2 рази менше частоти відмов трубопроводу:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (\text{C.16})$$

Підставляючи у вираз (C.15) замість  $p_3$  і дужки  $(1 - p_2)$  їх вирази через  $p$ , отримаємо

$$P_{2+n2,E}^f = p_a^4 \left[ 1 - \left( \frac{1 - p_a p}{2} \right)^2 \right] p. \quad (\text{C.17})$$

Вираз (C.17) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою  $E$ -типу. При абсолютній надійності засувки ( $p_a = 1$ ) математична модель спрощується:

$$P_{2+n2,E}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1 - p}{2} \right)^2 \right] p. \quad (\text{C.18})$$

#### С.4. Перемичка $F$ -типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою  $F$ -типу (одна засувка  $a_{n1}$  встановлена на трубопровідній ділянці  $t_1$  або  $t_2$ , ще одна засувка  $a_{n2}$  – на ділянці  $t_3$  або  $t_4$ ), наведений на рис. С.10.

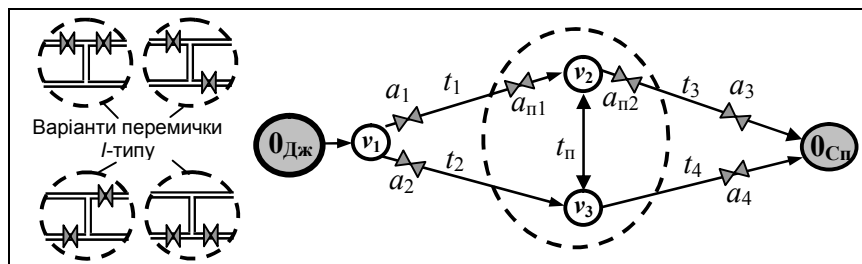


Рис. С.10 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $F$ -типу

Щоб початковий граф системи (рис. С.10) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра, що відповідає перемичці ( $t_p$ ), встановити значення вагової функції  $z_{23}$  рівним 0 (засувки на ділянці  $t_p$  відсутні). Результати розбиття відображені в табл. С.4.

Таблиця С.4 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{1,3}(t_2), e_{3,0_{\text{Сп}}}(t_4), e_{2,3}(t_{п})$	$a_2, a_{п1}, a_{п2}, a_4$	$v_2, v_3$
3	$e_{2,0_{\text{Сп}}}(t_3)$	$a_{п2}, a_3$	—
4	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.11.

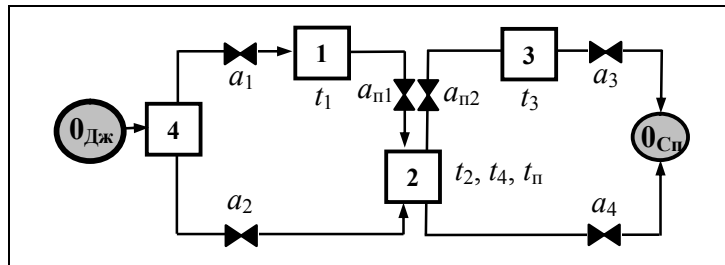


Рис. С.11 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $F$ -типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пk}$  – технічна надійність засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,2}$ . Тоді розрахункова модель функціональної надійності системи має вигляд, показаний на рис. С.12.

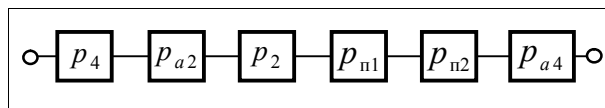


Рис. С.12 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $F$ -типу

Постачання ЦП споживачеві в системі з перемичкою  $F$ -типу можливе тільки за умови одночасної безвідмовної роботи зон №2, №4 і засувки  $a_4, a_{п1}, a_{п2}, a_4$ . Тому розрахункова схема на рис. С.12 є

послідовною моделлю надійності цих елементів. Надійність же зон №1, №3 і засувки  $a_1, a_{п1}, a_{п2}, a_3$  на функціональну надійність системи не впливає.

Шукана функціональна надійність всієї системи, згідно з розрахунковою моделлю (рис. С.12), відповідає виразу

$$P_{2+п2,F}^f = p_4 p_{a2} p_2 p_{п1} p_{п2} p_{a4}. \quad (C.19)$$

Технічною ненадійністю АРЗ №4 через порівняно невелику сумарну довжину трубопроводних ділянок (в порівнянні з АРЗ №2) можна знехтувати, тобто покласти  $p_4 = 1$ . Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{aj} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ . З урахуванням зроблених зауважень вираз (C.19) набуває вигляду

$$P_{2+п2,F}^f = p_a^4 p_2. \quad (C.20)$$

Якщо нехтувати довжиною ділянки  $t_{п}$ , то сумарна довжини трубопроводних ділянок АРЗ №2 дорівнює довжині кожного з двох паралельних трубопроводів у системі на рис. 3.3, тобто  $p_2 = p$ . Тоді

$$P_{2+п2,F}^f = p_a^4 p. \quad (C.21)$$

Вираз (C.21) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою  $F$ -типу. При абсолютній надійності засувки ( $p_a = 1$ ) математична модель спрощується:

$$P_{2+п2,F}^f = p. \quad (C.22)$$

### С.5. Перемичка $G$ -типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою  $G$ -типу (одна несиметрично встановлена засувка) наведений на рис. С.19.



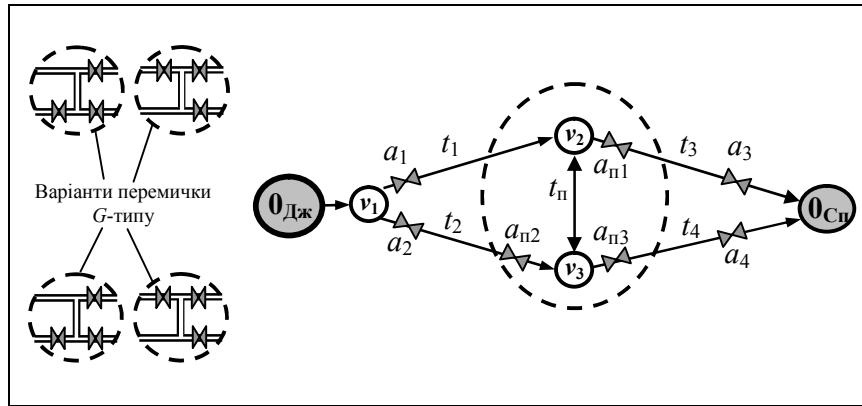


Рис. С.13 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $G$ -типу

Щоб початковий граф системи (рис. С.13) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра, що відповідає перемичці ( $t_{\text{п}}$ ), встановити значення вагової функції  $z_{23}$  рівним 0 (засувки на ділянці  $t_{\text{п}}$  відсутні). Результати розбиття відображені в табл. С.5.

Таблиця С.5 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2}(t_1), e_{2,3}(t_{\text{п}})$	$a_1, a_{\text{п1}}, a_{\text{п2}}, a_{\text{п3}}$	$v_2, v_3$
2	$e_{1,3}(t_2)$	$a_2, a_{\text{п2}}$	—
3	$e_{2,0_{\text{Сп}}}(t_3)$	$a_{\text{п1}}, a_3$	—
4	$e_{3,0_{\text{Сп}}}(t_4)$	$a_{\text{п3}}, a_4$	—
5	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.14.

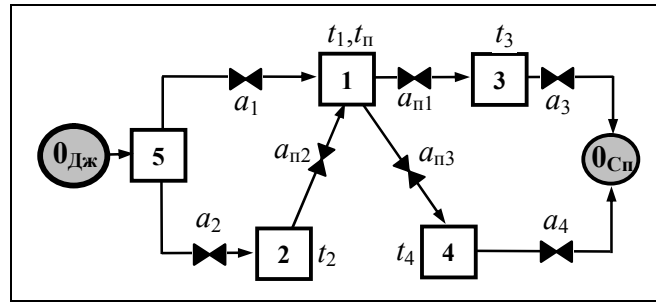


Рис. С.14 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $G$ -типу

Нехай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,5}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пк}$  – технічна надійність засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,3}$ . Тоді розрахункова модель функціональної надійності системи має вигляд, показаний на рис. С.15.

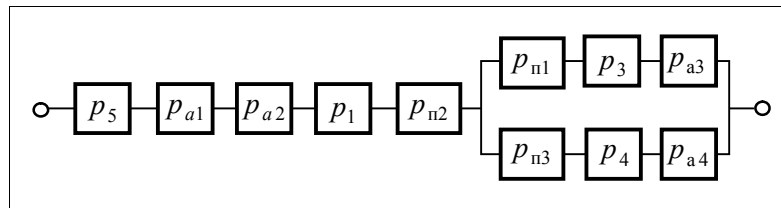


Рис. С.15 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $G$ -типу

У розрахунковій схемі відсутня надійність АРЗ №2 і засувки  $a_2$ . Зв'язано це з тим, що надійність постачання ЦП не залежить від стану АРЗ №2 та засувки  $a_2$ . Постачання ЦП споживачеві в системі з перемичкою  $G$ -типу можлива, якщо хоч би одна із зон №3 і №4 знаходиться в справному стані. Тому в розрахунковій схемі на рис. С.15 їм відповідає паралельна модель надійності. Якщо тільки обидві зони одночасно виявляються непрацездатними або відмовить будь-який інший елемент мережі, то в цьому випадку транспорт ЦП споживачеві буде припинений.

Шукана функціональна надійність всієї системи, згідно з розрахунковою моделлю (рис. С.15), відповідає виразу

$$P_{2+п3,G}^f = p_5 p_{a1} p_1 p_{п2} [1 - (1 - p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_{п3} p_4 p_{a4})]. \quad (C.23)$$

Технічною ненадійністю АРЗ №5 через порівняно невелику сумарну довжину трубопроводних ділянок (в порівнянні з АРЗ №1, №3 або №4) можна знехтувати, тобто покласти  $p_5 = 1$ . Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{aj} = p_{pk} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $k \in \overline{1,3}$ . З урахуванням зроблених зауважень вираз (С.23) набуває вигляду

$$P_{2+п3,G}^f = p_a^2 p_1 \left[ 1 - (1 - p_3 p_a^2)(1 - p_4 p_a^2) \right]. \quad (\text{С.24})$$

Якщо нехтувати довжиною трубопроводної ділянки, то сумарна довжина трубопроводних ділянок кожній з АРЗ №1, №3 або №4 у 2 рази менше довжини кожного з двох паралельних трубопроводів в системі на рис. 3.3. Тому частота відмов (ненадійність) в АРЗ №1, №3 або №4 буде в 2 рази менше частоти відмов трубопроводу:

$$(1 - p_1) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (\text{С.25})$$

Звідси

$$p_1 = p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2}. \quad (\text{С.26})$$

Підставляючи у вираз (С.24) замість  $p_3$  і  $p_4$  їх вирази через  $p$ , отримаємо

$$P_{2+п3,G}^f = p_a^2 \frac{1 + p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1 + p}{2} p_a^2 \right)^2 \right]. \quad (\text{С.27})$$

Вираз (С.27) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою  $G$ -типу. При абсолютній надійності засувки ( $p_a = 1$ ) математична модель спрощується:

$$P_{2+п3,G}^f = \frac{1 + p}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1 + p}{2} \right)^2 \right]. \quad (\text{С.28})$$

### С.6. Перемичка $L$ -типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою  $L$ -типу (чотири симетрично встановлені засувки) зображений на рис. С.16.

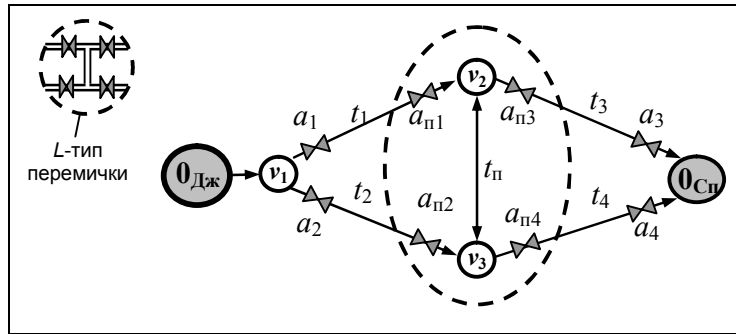


Рис. С.16– Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою L-типу

Щоб початковий граф системи (рис. С.16) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра, що відповідає перемичці, встановити значення вагової функції  $z_{23}$  рівним 0 (засувки на ділянці  $t_p$  відсутні). Результати розбиття відображені в табл. С.6.

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.17.

Таблиця С.6 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2} (t_1), e_{2,3} (t_p)$	$a_1, a_{п1}$	
2	$e_{1,3} (t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{2,0_{Сп}} (t_3)$	$a_{п3}, a_{a3}$	—
4	$e_{3,0_{Сп}} (t_4)$	$a_{п4}, a_{a4}$	—
5	$e_{2,3} (t_p)$	$a_{п1}, a_{п2}, a_{п3}, a_{п4}$	$v_2, v_3$
6	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.17.

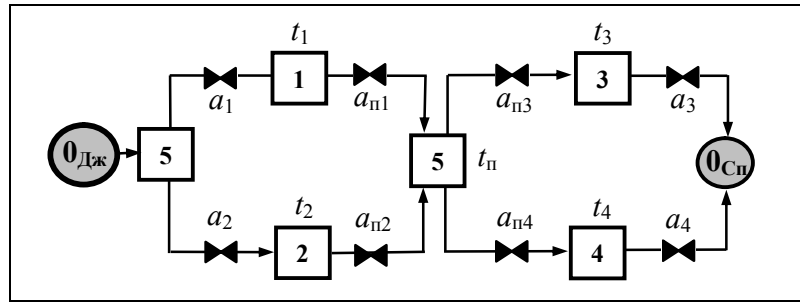


Рис. С.17 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $L$ -типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,6}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пк}$  – технічна надійність засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,4}$ . Тоді розрахункова модель функціональної надійності системи має вигляд, показаний на рис. С.18.

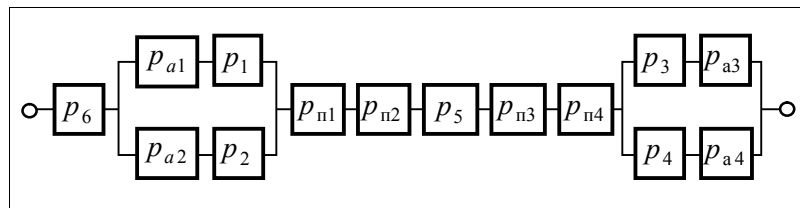


Рис. С.18 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $L$ -типу

Постачання ЦП споживачеві в системі з перемичкою  $L$ -типу не припиняється, якщо працездатна ділянка, що складається із зони №1 і засувки  $a_1$ , або ділянка, що складається із зони №2 і засувки  $a_2$ . Тому на розрахунковій схемі їм відповідає паралельна модель надійності, аналогічно постачання ЦП не припиняється якщо працездатна ділянка, що складається із зони №3 і засувки  $a_3$ , або ділянка, що складається із зони №4 і засувки  $a_4$ . Цим ділянкам (включаючи відповідні засувки) в розрахунковій схемі також відповідає паралельна модель. Вихід з ладу однієї з АРЗ №4 або №5 або вихід з ладу однієї із засувок, або одночасний вихід зон №1 і №2, або зон №3 і №4 (включаючи відповідні засувки) приводить до припинення постачання ЦП споживачеві. Тому в схемі на рис. С.18 цим елементам відповідає послідовна модель надійності.

Шукана функціональна надійність всієї системи, згідно з розрахунковою моделлю (рис. С.18), відповідає виразу

$$P_{2+\pi 4,L}^f = p_6 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] p_{\pi 1} p_{\pi 2} p_5 \times \\ \times p_{\pi 3} p_{\pi 4} [1 - (1 - p_3 p_{a3})(1 - p_4 p_{a4})]. \quad (C.29)$$

Технічною ненадійністю АРЗ №5, як і АРЗ №6, через порівняно невелику сумарну довжину трубопроводних ділянок (в порівнянні з АРЗ №1, №2, №3 або №4) можна знехтувати, тобто  $p_5 = p_6 = 1$ . Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{aj} = p_{\pi k} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $k \in \overline{1,4}$ . З урахуванням зроблених зауважень вираз (C.48) набуває вигляду

$$P_{2+\pi 4,L}^f = p_a^6 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] [1 - (1 - p_3 p_a)(1 - p_4 p_a)]. \quad (C.30)$$

Сумарна довжина трубопроводних ділянок кожній з АРЗ №1, №2, №3 і №4 у 2 рази менше довжини кожного з двох паралельних трубопроводів в системі на рис. 3.3. Тому частота відмов (ненадійність) в АРЗ №1, №2, №3 або №4 буде в 2 рази менше частоти відмов трубопроводу:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (C.31)$$

Звідси

$$p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2}. \quad (C.32)$$

Підставляючи у вираз (C.30) замість,  $(1 - p_2)$  праву частину виразу (C.31), а замість  $p_3$  і  $p_4$  праву частину виразу (C.32), отримаємо

$$P_{2+\pi 4,L}^f = p_a^6 \left[ 1 - \left( \frac{1 - p}{2} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1 + p}{2} p_a \right)^2 \right]. \quad (C.33)$$

Вираз (C.52) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою  $L$ -типу. При абсолютній надійності засувки ( $p_a = 1$ ) математична модель спрощується:

$$P_{2+\pi 4,L}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1 - p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (C.34)$$

### С.7. Перемичка М-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою М-типу (п'ять засувок, по одній на кожній трубопровідній ділянці перемички) зображений на рис. С.19.

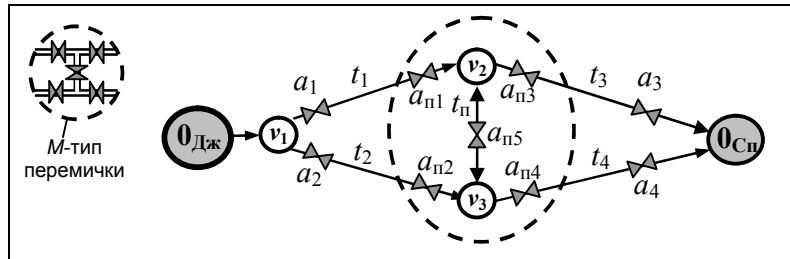


Рис. С.19 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою М-типу

Щоб початковий граф системи (рис. С.19) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра, що відповідає трубопровідній ділянці перемички  $t_{п}$ , встановити значення вагової функції  $z_{23}$  рівним 1 (засувка  $a_{п5}$  знаходиться на початку труби  $t_{п}$ ) або 2 (засувка  $a_{п5}$  знаходиться в кінці труби  $t_{п}$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{23} = 1$  і  $z_{23} = 2$  указують на одне і те ж розташування засувки. Результати розбиття відображені в табл. С.7.

Таблиця С.7 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{1,2} (t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{1,3} (t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{2,0_{Сп}} (t_3)$	$a_{п3}, a_3$	—
4	$e_{3,0_{Сп}} (t_4)$	$a_{п4}, a_4$	—
5	$e_{2,3}$ , якщо $z_{2,3}=2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{п5}$	$v_2$
6	$e_{2,3}$ , якщо $z_{2,3}=1$	$a_{п2}, a_{п4}, a_{п5}$	$v_3$
7	—	$a_1, a_2$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. С.20.

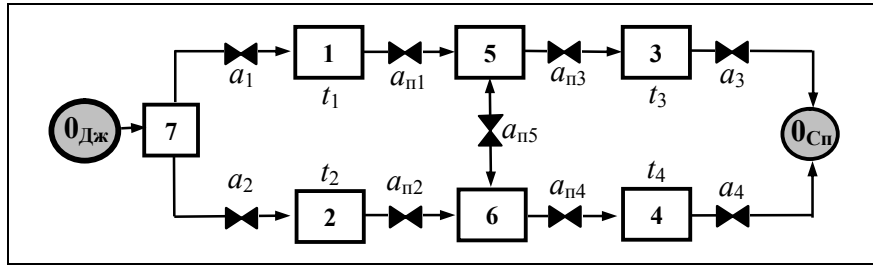


Рис. С.20 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою *M*-типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,7}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пk}$  – технічні надійності засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,5}$ . Тоді розрахункова модель функціональної надійності системи має вигляд, показаний на рис. С.21.

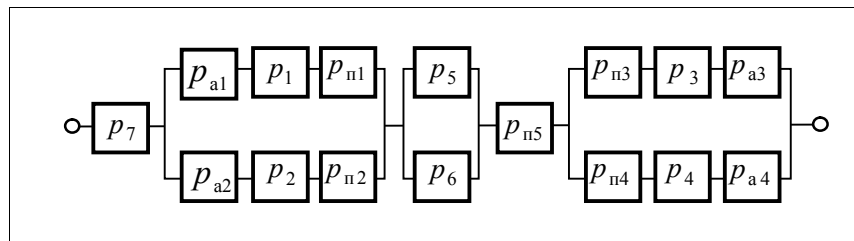


Рис. С.21 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою *M*-типу

Перехід від графа АРЗ до розрахункової моделі функціональної надійності системи детально описаний в п. 3.3. Єдина відміна в розрахунковій моделі (рис. С.21) спостерігається з розташуванням блоків, що відповідають надійності засувки  $a_1$  і  $a_2$ . Пояснюється це тим, що зараз ЦП подається від насосної станції зі своєю системою засувки, а не від окремого насосного агрегату, як було раніше в п. 3.3.

Шукана функціональна надійність всієї системи, згідно з розрахунковою моделлю (рис. С.21), відповідає виразу

$$P_{2+п5,M}^f = p_7 [1 - (1 - p_{a1} p_1 p_{п1}) (1 - p_{a2} p_2 p_{п2})] p_{п5} \times \\ \times [1 - (1 - p_5) (1 - p_6)] [1 - (1 - p_{п3} p_3 p_{a3}) (1 - p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (C.35)$$



Технічною ненадійністю АРЗ №5, №6 і №7 через порівняно невелику сумарну довжину трубопроводних ділянок (в порівнянні з АРЗ №1, №2, №3 або №4) можна знехтувати, тобто покласти  $p_5 = p_6 = p_7 = 1$ . Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати  $i \in \overline{1,4}$ ,  $k \in \overline{1,5}$ . З урахуванням зроблених зауважень вираз (С.35) набуває вигляду

$$P_{2+п5,M}^f = [1 - (1 - p_1 p_a^2)(1 - p_2 p_a^2)] p_{п5} [1 - (1 - p_3 p_a^2)(1 - p_4 p_a^2)] = \\ = [1 - (1 - p_1 p_a^2)(1 - p_2 p_a^2)]^2 p_{п5} . \quad (C.36)$$

Сумарна довжина трубопроводних ділянок кожній з АРЗ №1, №2, №3 і №4 у 2 рази менше довжини кожного з двох паралельних трубопроводів в системі на рис. 3.3. Тому частота відмов (ненадійність) в АРЗ №1, №2, №3 або №4 буде в 2 рази менше частоти відмов трубопроводу:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p) . \quad (C.37)$$

Звідси

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2} . \quad (C.38)$$

Підставляючи у вираз (С.36) замість  $p_1, p_2, p_3, p_4$  праву частину виразу (С.38), отримаємо

$$P_{2+п5,M}^f = p_a \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right)^2 \right] . \quad (C.39)$$

Вираз (С.39) є математичною моделлю функціональної надійності системи двох трубопроводів, сполучених перемичкою М-типу. При абсолютній надійності засувки ( $p_a = 1$ ) математична модель спрощується:

$$P_{2+п5,M}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2 . \quad (C.59)$$

## Додаток D. Побудова спрощених математичних моделей для оцінки функціональної надійності системи з однією перемичкою

Побудова математичних моделей оцінки функціональної надійності проводиться першим модифікованим методом АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою типу *B, D, H, I, J, K* або *M*. Розбиття системи на аварійно-ремонтні зони (АРЗ) здійснюється за алгоритмом, викладеному в [55].

### D.1. Перемичка *B*-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою *B*-типу зображений на рис. D.1.

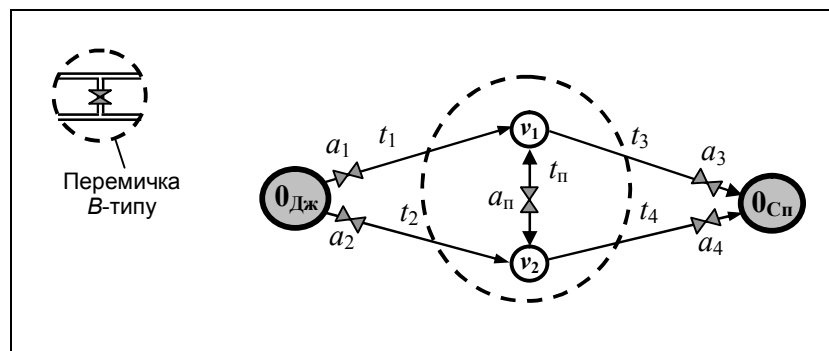


Рис. D.1 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою *B*-типу

Щоб початковий граф системи (рис. D.1) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра  $t_{\text{п}}$  встановити значення вагової функції  $z_{1,2}$  рівним 1 (засувка  $a_{\text{п}}$  знаходиться на початку труби  $t_{\text{п}}$ ) або 2 (засувка  $a_{\text{п}}$  знаходиться в кінці труби  $t_{\text{п}}$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{1,2} = 1$  і  $z_{1,2} = 2$  указують на одне і те ж розташування засувки. Результати розбиття відображені в табл. D.1.

Таблиця D.1 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{Дж},1}(t_1), e_{1,0_{Сп}}(t_3), e_{1,2}(t_{\Pi})$ при $z_{1,2}=2$	$a_1, a_2, a_{\Pi}$	$v_1$
2	$e_{0_{Дж},2}(t_2), e_{2,0_{Сп}}(t_4), e_{1,2}(t_{\Pi})$ при $z_{1,2}=1$	$a_3, a_4, a_{\Pi}$	$v_2$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. D.2.

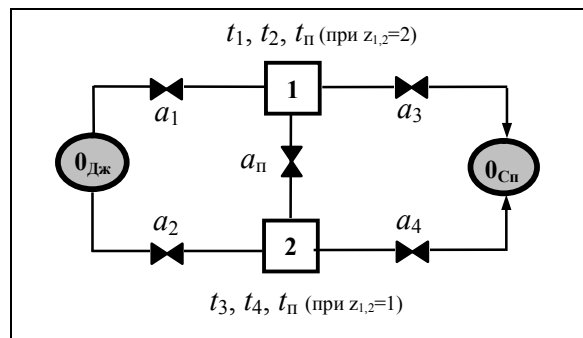


Рис. D.2 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою B-типу

Нехай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,2}$ ;  $p_{a_j}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{\Pi}$  – технічна надійність засувки, що належить перемичці.

Якщо центральна засувка  $a_{\Pi}$  знаходиться в положенні «відкрито», то зони №1 і №2 можна розглядати як єдину зону з сумарною довжиною трубопровідних ділянок, що в 2 рази перевищує довжину кожного з двох паралельних трубопроводів. Тоді частота відмов такої зони також в 2 рази перевищуватиме частоту відмов одного трубопроводу:

$$(1 - p_{1,2}) = 2(1 - p). \quad (D.1)$$

Тут  $p_{1,2}$  – ймовірність безвідмовної роботи єдиної зони №1+№2. З (D.1)

$$p_{1,2} = 2p - 1, \quad (\text{D.2})$$

де  $p > \frac{1}{2}$ .

Перша модель надійності (при знаходженні центральної засувки  $a_{\Pi}$  перемички  $B$ -типу в положенні «відкрито») відповідає схемі, зображеній на рис. D.3, а друга (при знаходженні засувки  $a_{\Pi}$  в положенні «закрито») – схемі на рис. D.4.

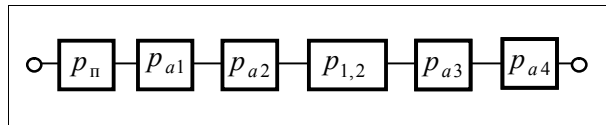


Рис. D.3 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $B$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито»

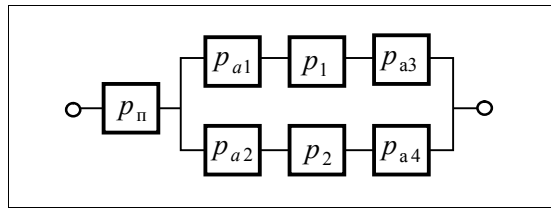


Рис. D.4 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $B$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито»

Згідно розрахунковій схемі на рис. D.3, функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито» і визначається виразом

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{відкр}}^f = p_{\Pi} p_{a1} p_{a2} p_{1,2} p_{a3} p_{a4}. \quad (\text{D.3})$$

Згідно розрахунковій схемі на рис. D.4, функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито» визначається виразом

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{закр}}^f = p_{\Pi} [1 - (1 - p_{a1} p_1 p_{a3})(1 - p_{a2} p_2 p_{a4})]. \quad (\text{D.4})$$

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{aj} = p_n = p_a$ ,  $j \in \overline{1,4}$ .

Початкова імовірність  $p_1$  і  $p_2$  безвідмовної роботи відповідно зон №1 і №2 при закритій центральній засувці  $a_n$  дорівнюють  $p$ .

З урахуванням (D.2) і зроблених зауважень вирази (D.3) та (D.4) відповідно набувають вигляду

$$P_{2+n1,B,\text{відкр}}^f = 2p_a^5(1-p); \quad (\text{D.5})$$

$$P_{2+n1,B,\text{закр}}^f = p_a \left[ 1 - (1 - pp_a^2)(1 - pp_a^2) \right]. \quad (\text{D.6})$$

Якщо вважати технічну надійність всіх засувок абсолютною, тобто  $p_a = 1$ , то маємо дві спрощені математичні моделі функціональної надійності для системи, схема якої зображена на рис. D.1:

– для засувки  $a_{n2}$  в положенні «відкрито», згідно схеми розрахункової моделі на рис. D.3,

$$P_{2+n1,B,\text{відкр}}^f = 2(1-p); \quad (\text{D.7})$$

– для засувки  $a_{n2}$  в положенні «закрито», згідно схеми розрахункової моделі на рис. D.4,

$$P_{2+n1,B,\text{закр}}^f = 1 - (1-p)^2. \quad (\text{D.8})$$

Таким чином, шукана спрощена модель оцінки функціональної надійності системи з перемичкою  $B$ -типу має вигляд

$$2(1-p) \leq P_{2+n1,B}^f \leq 1 - (1-p)^2. \quad (\text{D.9})$$

## D.2. Перемичка D-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою  $D$ -типу зображений на рис. D.5.

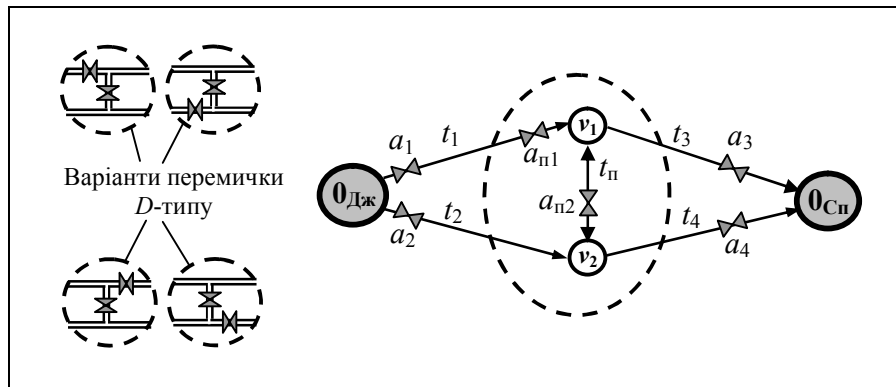


Рис. D.5 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою D -типу

Щоб початковий граф системи (рис. D.4) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, слідє для дуги, ділянка  $t_{\pi}$ , встановити значення вагової функції  $z_{2,3}$  рівним 1 (засувка  $a_{\pi 2}$  знаходиться на початку труби  $t_{\pi}$ ) або 2 (засувка  $a_{\pi 2}$  знаходиться в кінці труби  $t_{\pi}$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{2,3} = 1$  і  $z_{2,3} = 2$  указують на одне й те ж розташування засувки. Результати розбиття відображені в табл. D.2.

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. D.5.

Таблиця D.2 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{Дж},1}(t_1)$	$a_1, a_{\pi 1}$	—
2	$e_{0_{Дж},2}(t_2), e_{2,0_{Сп}}(t_4)$ $e_{1,2}(t_{\pi})$ при $z_{2,3} = 1$	$a_2, a_{\pi 2}, a_4$	$v_2$
3	$e_{1,0_{Сп}}(t_3)$ $e_{1,2}(t_{\pi})$ при $z_{2,3} = 2$	$a_{\pi 1}, a_{\pi 2}, a_3$	$v_1$

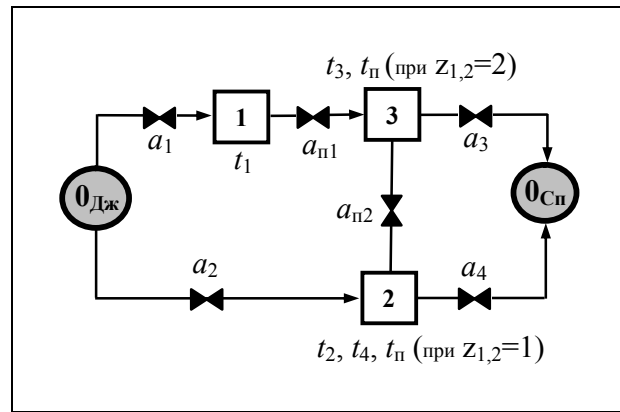


Рис. D.6 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою D-типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,3}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пк}$  – технічна надійність  $k$ -ї засувки, належній перемичці,  $k = \overline{1,2}$ .

Якщо центральна засувка  $a_{п2}$  знаходиться в положенні «відкрито», то зони №2, №3 та №4 можна розглядати як єдину зону з сумарною довжиною трубопровідних ділянок, що в півтора рази перевищує довжину кожного з двох паралельних трубопроводів. Тоді частота відмов в такій зоні також в півтора рази перевищуватиме частоту відмов одного трубопроводу:

$$(1 - p_{2,3}) = \frac{3}{2}(1 - p). \quad (D.10)$$

Тут  $p_{2,3}$  – ймовірність безвідмовної роботи єдиної зони. З виразу (D.10)

$$p_{2,3} = \frac{3p - 1}{2}, \quad (D.11)$$

де  $p > \frac{1}{3}$ .

Перша модель надійності (при знаходженні центральної засувки  $a_{п2}$  перемички D-типу в положенні «відкрито») відповідає схемі, зображеній на рис. D.7, а друга (при знаходженні засувки  $a_{п2}$  в положенні «закрито») – схемі на рис. D.8.

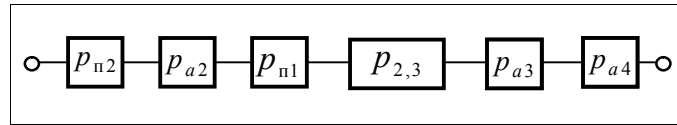


Рис. D.7 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою D-типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито»

Друга модель надійності (при знаходженні засувки  $a_{п2}$  в положенні «закрито») відповідає схемі, зображеній на рис. D.8.

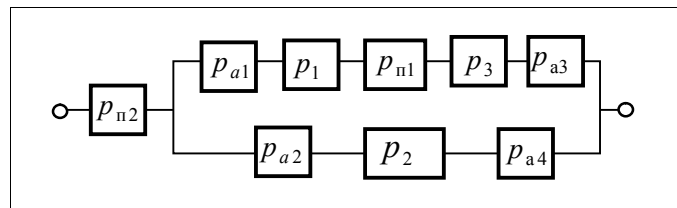


Рис. D.8 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою D-типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито»

Згідно з розрахунковою схемою (рис. D.7), функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито» не залежить від АРЗ №1 і засувки  $a_{п1}$  і визначається виразом

$$P_{2+п2,D,відкр}^f = p_{п2} p_{a2} p_{п1} p_{2,3} p_{a3} p_{a4}. \quad (D.12)$$

Згідно розрахунковій схемі (рис. D.8) функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито» визначається виразом:

$$P_{2+п2,D,закр}^f = p_{п2} [1 - (1 - p_{a1} p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_{a2} p_2 p_{a4})]. \quad (D.13)$$

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{a_j} = p_{п_k} = p_a$ ,  $j \in \overline{1,4}$ ,  $k \in \overline{1,2}$ .

Сумісна вірогідність  $p_{2,3}$  безвідмовної роботи зон №2 і №3 при відкритій центральній засувці  $a_{п2}$  становить  $\frac{3p-1}{2}$ .



Початкова ймовірність  $p_2$  безвідмовної роботи зони №2 при закритій центральній засувці  $a_{п2}$  дорівнює  $p$ .

З урахуванням (D.11) і зроблених зауважень вирази (D.12) і (D.13) відповідно набувають вигляду

$$P_{2+п2,D,відкр}^f = p_a^5 \frac{3p-1}{2}; \quad (D.14)$$

$$P_{2+п2,D,закр}^f = p_a \left[ 1 - (1 - p_1 p_a^3 p_3) (1 - p p_a^2) \right]. \quad (D.15)$$

Початкова ймовірність безвідмовної роботи кожної із зон №1 і №3 визначаються за формулою (3.24):

$$p_1 = p_3 = \frac{1+p}{2}. \quad (D.16)$$

Підставляючи (D.16) в (D.15), отримаємо

$$P_{2+п2,D,закр}^f = p_a \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right] [1 - p p_a^2] \right\}. \quad (D.17)$$

Якщо вважати технічну надійність всіх засувов абсолютною, тобто  $p_a = 1$ , то маємо дві спрощені математичні моделі функціональної надійності для системи, схема якої зображена на рис. D.5:

– для засувки  $a_{п2}$  в положенні «відкрито», згідно з розрахунковою моделлю на рис. D.7

$$P_{2+п2,D,відкр}^f = \frac{3p-1}{2}; \quad (D.18)$$

– для засувки  $a_{п2}$  в положенні «закрито», згідно з розрахунковою моделлю на рис. D.8

$$P_{2+п2,D,закр}^f = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] (1-p). \quad (D.19)$$

Таким чином, шукана спрощена модель оцінки функціональної надійності системи з перемичкою D-типу має вигляд

$$\frac{3p-1}{2} \leq P_{2+n2,D}^f \leq 1 - (1-p) \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (\text{D.20})$$

### Д.3. Перемичка *H*-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою *H*-типу зображений на рис. D.9.

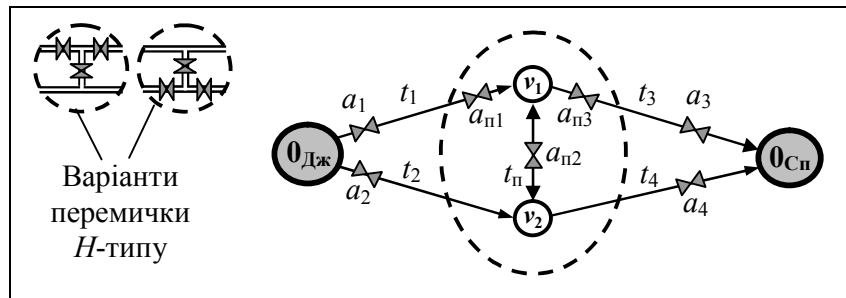


Рис. D.9 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою *H*-типу

Щоб початковий граф системи (рис. D.9) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, слідє для дуги, ділянка  $t_{\text{п}}$ , встановити значення вагової функції  $z_{2,3}$  рівним 1 (засувка  $a_{\text{п}2}$  знаходиться на початку труби  $t_{\text{п}}$ ) або 2 (засувка  $a_{\text{п}2}$  знаходиться в кінці труби  $t_{\text{п}}$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{2,3} = 1$  і  $z_{2,3} = 2$  вказують на одне й те ж розташування засувки. Результати розбиття відображені в табл. D.4.

Таблиця D.4 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{\text{Дж}},1}(t_1)$	$a_1, a_{\text{п}1}$	—
2	$e_{0_{\text{Дж}},2}(t_2), e_{2,0_{\text{Сп}}}(t_4),$ $e_{2,3}(t_{\text{п}})$ при $z_{2,3} = 1$	$a_2, a_{\text{п}2}, a_4$	$v_2$
3	$e_{1,0_{\text{Сп}}}(t_3)$	$a_{\text{п}3}, a_3$	—
4	$e_{2,3}(t_{\text{п}})$ при $z_{2,3} = 2$	$a_{\text{п}1}, a_{\text{п}2}, a_{\text{п}3}$	$v_1$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. D.10.

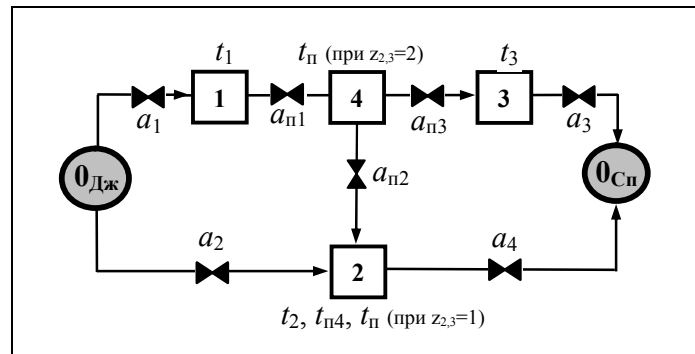


Рис. D.10 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $H$ -типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пк}$  – технічні надійність засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,3}$ .

Перша модель надійності (при знаходженні центральної засувки  $a_{п2}$  перемички  $H$ -типу в положенні «відкрито») відповідає схемі, зображеній на рис. D.11, а друга (при знаходженні засувки  $a_{п2}$  в положенні «закрито») – схемі на рис. D.12.

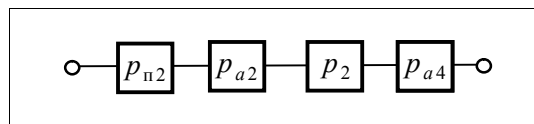


Рис. D.11 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $H$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито»

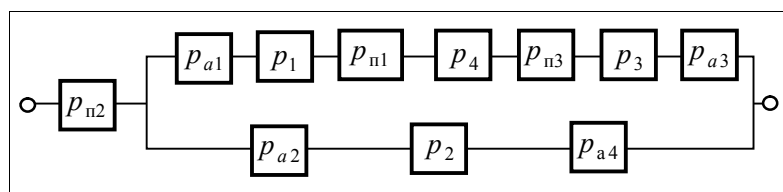


Рис. D.12 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $H$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито»

Згідно з розрахунковою схемою (рис. D.11), функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки  $a_{п2}$  в положенні «відкрито» не залежить від АРЗ №1, №3, №4 та засувки  $a_{a1}$ ,  $a_{a3}$ ,  $a_{п1}$  і  $a_{п3}$  і визначається виразом:

$$P_{2+п3, H, \text{відкр}}^f = p_{п2} p_{a2} p_2 p_{a4}. \quad (D.21)$$

Згідно з розрахунковою схемою (рис. D.12) функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки  $a_{п2}$  в положенні «закрито» визначається виразом:

$$P_{2+п3, H, \text{закр}}^f = p_{п2} p_5 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_4 p_{п3} p_3 p_{a3}) (1 - p_2 p_{a4})]. \quad (D.22)$$

Надійність  $p_4$  зони №4 через порівняно малу довжину трубопроводних ділянок приймають рівною одиниці.

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{ai} = p_{пj} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $j \in \overline{1,3}$ .

Початкова імовірність  $p_2$  безвідмовної роботи зони №2 дорівнює імовірності безвідмовної роботи трубопроводу  $p$ .

З урахуванням зроблених зауважень вирази (D.21) і (D.22) відповідно набувають вигляду

$$P_{2+п3, H, \text{відкр}}^f = p_a^3 p; \quad (D.23)$$

$$P_{2+п3, H, \text{закр}}^f = p_a [1 - (1 - p_1 p_a^4 p_3) (1 - p_2 p_a^2)]. \quad (D.24)$$

Початкова ймовірність безвідмовної роботи кожної із зон №1 і №3 визначаються за формулою (3.24), тобто

$$p_1 = p_3 = \frac{1+p}{2}. \quad (D.25)$$

Підставляючи (D.25) в (D.24), отримаємо

$$P_{2+п3, H, \text{закр}}^f = p_a \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^4 \right] \left[ 1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right] \right\}. \quad (D.26)$$

Якщо вважати технічну надійність всіх засувок абсолютною, тобто, то маємо дві спрощені математичні моделі функціональної надійності для системи, схема якої наведена на рис. D.9:

– для засувки  $a_{п3}$  в положенні «відкрито», згідно з розрахунковою моделлю на рис. D.11

$$P_{2+п3,H,відкр}^f = p; \quad (D.27)$$

– для засувки  $a_{п3}$  в положенні «закрито», згідно з розрахунковою моделлю на рис. D.12

$$P_{2+п3,H,закр}^f = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left[ 1 - \frac{1+p}{2} \right] = p + (1-p) \left( \frac{1+p}{2} \right)^2. \quad (D.28)$$

Таким чином, шукана спрощена модель оцінки функціональної надійності системи з перемичкою  $H$ -типу має вигляд

$$p \leq P_{2+п3,H}^f \leq p + (1-p) \left( \frac{1+p}{2} \right)^2. \quad (D.29)$$

#### D.4. Перемичка $I$ -типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою  $I$ -типу зображений на рис. D.13.

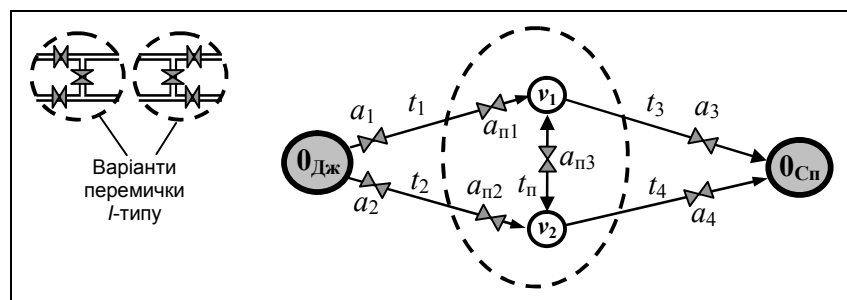


Рис. D.13 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $I$ -типу

Щоб початковий граф системи (рис. D.13) відповідав вимогам алгоритму розбиття мережі на АРЗ, треба для ребра  $t_{п}$ , встановити значення вагової функції  $z_{2,3}$  рівним 1 (засувка  $a_{п3}$  знаходиться на початку

труби  $t_{\Pi}$ ) або 2 (засувка  $a_{\Pi 3}$  знаходиться в кінці труби  $t_{\Pi}$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{2,3} = 1$  і  $z_{2,3} = 2$  указують на одне й те ж розташування засувки. Результати розбиття відображені в табл. D.5.

Таблиця D.5 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{Дж},1}(t_1)$	$a_1, a_{\Pi 1}$	—
2	$e_{0_{Дж},2}(t_2)$	$a_2, a_{\Pi 2}$	—
3	$e_{1,0_{Сп}}(t_3), e_{1,2}(t_{\Pi})$ при $z_{2,3} = 2$	$a_{\Pi 1}, a_{\Pi 3}, a_3$	$v_1$
4	$e_{2,0_{Сп}}(t_4), e_{1,2}(t_{\Pi})$ при $z_{2,3} = 1$	$a_{\Pi 2}, a_{\Pi 3}, a_4$	$v_2$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. D.14.

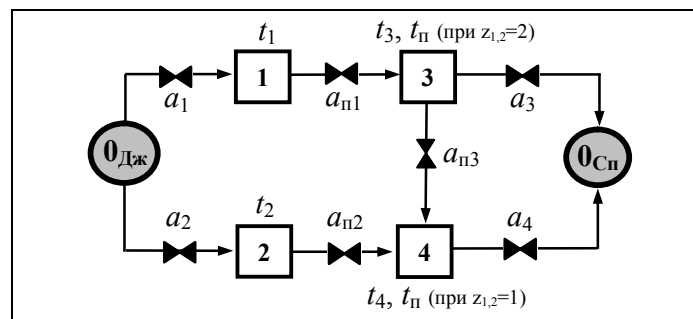


Рис. D.14 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою I-типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{\Pi k}$  – технічні надійності засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,3}$ .

Перша модель надійності (при знаходженні центральної засувки  $a_{\Pi 3}$  перемички I-типу в положенні «відкрито») відповідає схемі, зображеній на

рис. D.15, а друга (при знаходженні засувки  $a_{п3}$  в положенні «закрито») – схемі на рис. D.16.

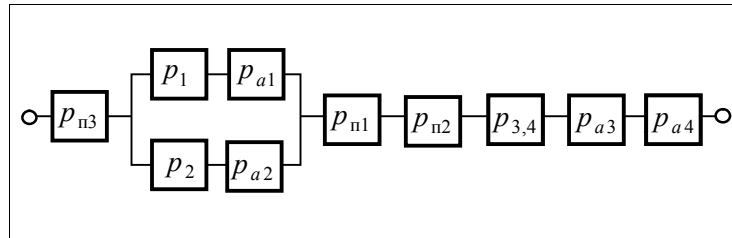


Рис. D.15 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою I-типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито»

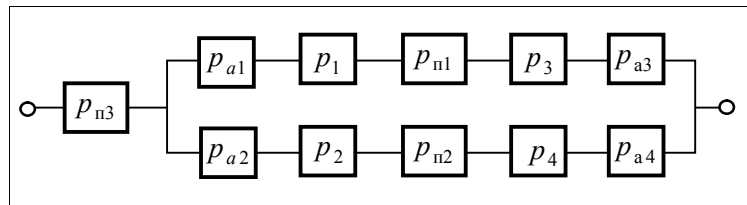


Рис. D.16 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою I-типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито»

Згідно розрахунковій схемі (рис. D.15), функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито» визначається виразом

$$P_{2+п3,I,відкр}^f = p_{п3} [1 - (1 - p_{a1}p_1)(1 - p_{a2}p_2)] p_{п1} p_{п2} p_{3,4} p_{a3} p_{a4}. \quad (D.30)$$

Згідно розрахунковій схемі (рис. D.20) функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито» визначається виразом

$$P_{2+п3,I,закр}^f = p_{п3} [1 - (1 - p_{a1}p_1p_{п1}p_3p_{a3})(1 - p_{a2}p_2p_{п2}p_4p_{a4})]. \quad (D.31)$$

Сумарна довжина трубопровідних ділянок АРЗ №3 і №4 рівна довжині кожного з двох паралельних трубопроводів. Тому їх загальна надійність становить  $p_{3,4} = p$ .

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{ai} = p_{\pi j} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $j \in \overline{1,3}$ ,

З урахуванням зроблених зауважень виразу (D.30) і (D.31) відповідно набувають вигляду

$$P_{2+\pi 3, I, \text{відкр}}^f = p_a^5 p [1 - (1 - p_1 p_a)(1 - p_2 p_a)]; \quad (\text{D.32})$$

$$P_{2+\pi 3, I, \text{закр}}^f = p_a [1 - (1 - p_1 p_3 p_a^3)(1 - p_2 p_4 p_a^3)]. \quad (\text{D.33})$$

Початкова ймовірність безвідмовної роботи кожної із зон №1 і №2 визначаються за формулою (3.24) таким чином:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (\text{D.34})$$

Підставляючи (D.34) в (D.32) і (D.33), отримуємо:

$$P_{2+\pi 3, I, \text{відкр}}^f = p_a^5 p \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]; \quad (\text{D.35})$$

$$P_{2+\pi 3, I, \text{закр}}^f = p_a \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right]^2 \right\}. \quad (\text{D.36})$$

Якщо вважати технічну надійність всіх засувки абсолютною, тобто  $p_a = 1$ , то маємо дві спрощені математичні моделі функціональної надійності для системи, схема якої зображена на рис. D.13:

– для засувки  $a_{\pi 3}$  в положенні «відкрито», згідно з розрахунковою моделлю на рис. D.15

$$P_{2+\pi 3, I, \text{відкр}}^f = p \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]; \quad (\text{D.37})$$

– для засувки  $a_{\pi 3}$  в положенні «закрито», згідно з розрахунковою моделлю на рис. D.16



$$P_{2+п3,I,закр}^f = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.38)$$

Таким чином, шукана спрощена модель функціональної надійності системи з перемичкою *I*-типу має вигляд

$$p \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \leq P_{2+п3,I}^f \leq 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.39)$$

### D.5. Перемичка *J*-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою *J*-типу зображений на рис. D.17.

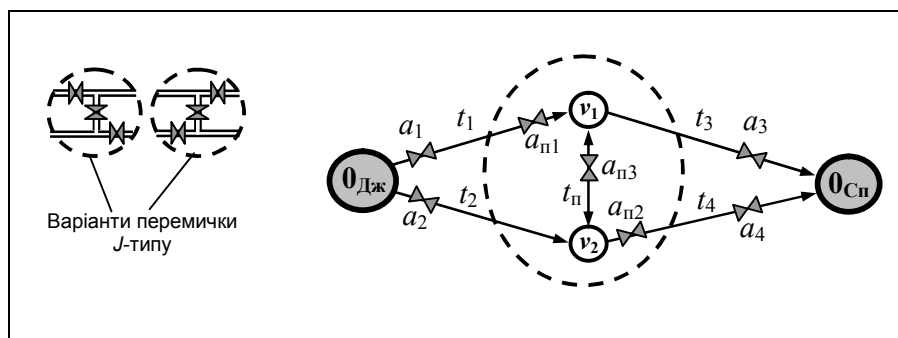


Рис. D.17– Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою *J*-типу

Докладна побудова математичної моделі оцінки функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою *J*-типу описана в п. 4.3.

### D.6. Перемичка *K*-типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою *K*-типу (одна несиметрично встановлена засувка) наведений на рис. D.18.

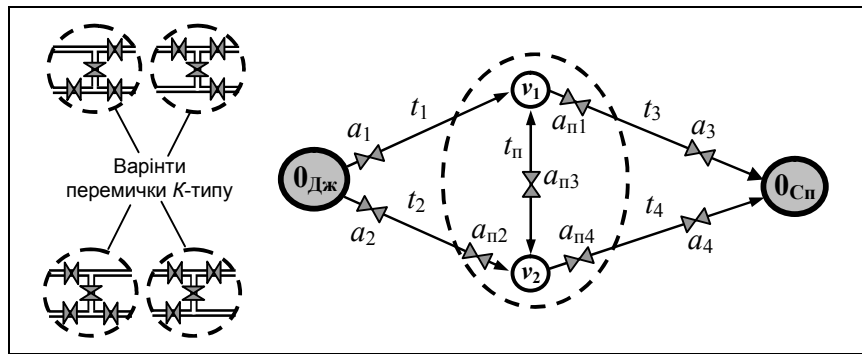


Рис. D.18– Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою К-типу

Щоб початковий граф системи (рис. D.18) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра  $t_{\text{п}}$  встановити значення вагової функції  $z_{2,3}$  рівним 1 (засувка  $a_{\text{п}3}$  знаходиться на початку труби  $t_{\text{п}}$ ) або 2 (засувка  $a_{\text{п}3}$  знаходиться в кінці труби  $t_{\text{п}}$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{2,3} = 1$  і  $z_{2,3} = 2$  вказують на одне і те ж розташування засувки. Результати розбиття відображені в табл. D.6.

Таблиця D.6 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{\text{Дж}},1}(t_1), e_{1,2}(t_{\text{п}})$ при $z_{2,3} = 2$	$a_1, a_{\text{п}1}, a_{\text{п}3}$	$v_1$
2	$e_{0_{\text{Дж}},2}(t_2)$	$a_2, a_{\text{п}2}$	—
3	$e_{1,0_{\text{Сп}}}(t_3)$	$a_{\text{п}1}, a_{a3}$	—
4	$e_{2,0_{\text{Сп}}}(t_4)$	$a_{\text{п}4}, a_{a4}$	—
5	$e_{1,2}(t_{\text{п}})$ при $z_{2,3} = 1$	$a_{\text{п}2}, a_{\text{п}3}, a_{\text{п}4}$	$v_2$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. D.19.

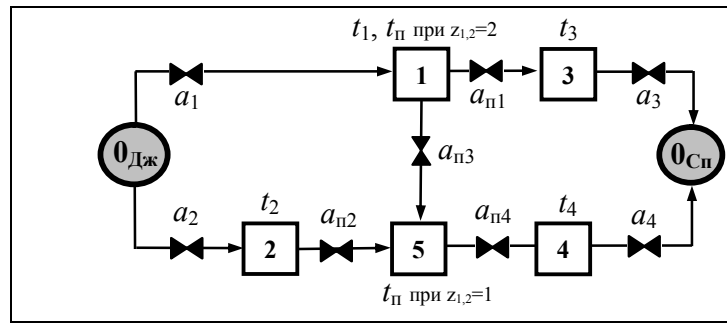


Рис. D.19 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $K$ -типу

Нехай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,5}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пк}$  – технічні надійності засувки, належній перемичці,  $k = \overline{1,4}$ .

Перша модель надійності (при знаходженні центральної засувки  $a_{п3}$  перемички  $K$ -типу в положенні «відкрито») відповідає схемі, зображеній на рис. D.20.

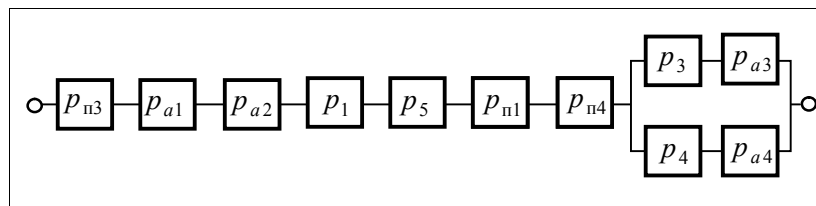


Рис. D.20 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $K$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито»

Друга модель надійності (при знаходженні центральної засувки  $a_{п3}$  в положенні «закрито») відповідає схемі, зображеній на рис. D.21.

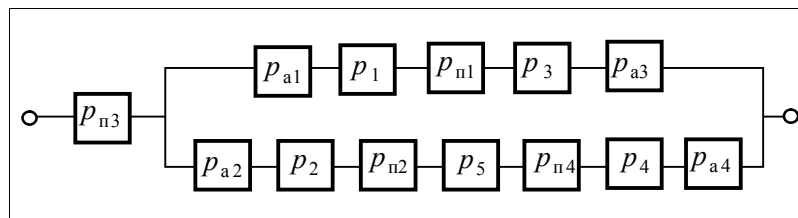


Рис. D.21 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $K$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито»

Згідно розрахунковій схемі (рис. D.20), функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито» не залежить від надійності АРЗ №2 та надійності засувки  $a_2$  і визначається виразом

$$P_{2+п4,K,відкр}^f = p_{п3} p_{a1} p_1 p_5 p_{п1} p_{п2} p_{п4} [1 - (1 - p_3 p_{a3})(1 - p_4 p_{a4})]. \quad (D.40)$$

Згідно розрахунковій схемі (рис. D.21) функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито» визначається виразом

$$P_{2+п4,O,закр}^f = p_{п3} [1 - (1 - p_{a1} p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_{a2} p_2 p_{п2} p_5 p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (D.41)$$

Надійність  $p_5$  зони №5 через порівняно малу довжину трубопроводних ділянок слід прийняти рівною одиниці.

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати, що  $p_{ai} = p_{пj} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $j \in \overline{1,4}$ ,

З урахуванням зроблених зауважень вирази (D.40) і (D.41) відповідно набувають вигляду

$$P_{2+п4,K,відкр}^f = p_a^5 p_1 [1 - (1 - p_3 p_a)(1 - p_4 p_a)]; \quad (D.42)$$

$$P_{2+п4,K,закр}^f = p_a [1 - (1 - p_1 p_3 p_a^3)(1 - p_2 p_4 p_a^4)]. \quad (D.43)$$

Початкова ймовірність безвідмовної роботи кожній із зон №1, №2, №3 і №4 визначаються за формулою (3.24) таким чином:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (D.44)$$

Підставляючи (D.44) в (D.42) і (D.43), отримаємо:

$$P_{2+п4,K,відкр}^f = p_a^5 \left( \frac{1+p}{2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]; \quad (D.45)$$

$$P_{2+п4,K,закр}^f = p_a \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right] \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^4 \right] \right\}. \quad (D.46)$$

Якщо вважати технічну надійність всіх засувок абсолютною, тобто  $p_a=1$ , то маємо дві спрощені математичні моделі функціональної надійності для системи, схема якої приведена на рис. D.18:

– для засувки  $a_{п3}$  в положенні «відкрито», згідно із схемою моделі на рис. D.20

$$P_{2+п4,K,відкр}^f = \left( \frac{1+p}{2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]; \quad (D.47)$$

– для засувки  $a_{п3}$  в положенні «закрито», згідно із схемою моделі на рис. D.21

$$P_{2+п4,K,закр}^f = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.48)$$

Таким чином, шукана спрощена модель оцінки функціональної надійності системи з перемичкою  $K$ -типу має вигляд

$$\left( \frac{1+p}{2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \leq P_{2+п4,K}^f \leq 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.49)$$

### D.7. Перемичка $M$ -типу

Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів з перемичкою  $M$ -типу наведений на рис. D.22.

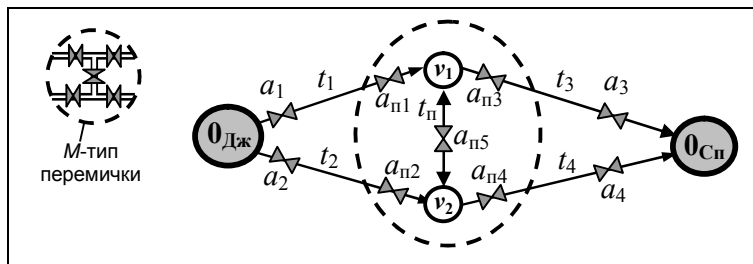


Рис. D.22 – Початковий граф для розрахунку функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою  $M$ -типу

Щоб початковий граф системи (рис. D.22) відповідав вимогам алгоритму розбиття на АРЗ, треба для ребра  $t_{п}$  встановити значення вагової функції  $z_{2,3}$  рівним 1 (засувка  $a_{п5}$  знаходиться на початку труби  $t_{п}$ )

або 2 (засувка  $a_{п5}$  знаходиться в кінці труби  $t_{п}$ ). Пояснюється це тим, що при нульовій довжині труби перемички значення вагової функції  $z_{2,3} = 1$  і  $z_{2,3} = 2$  указують на одне і те ж розташування засувки. Результати розбиття відображені в табл. D.7.

Таблиця D.7 – Розбиття трубопровідної мережі на АРЗ

№ АРЗ	Конструктивні елементи АРЗ		
	Трубопровідні ділянки системи (ребра графа)	Суттєві засувки	Колодязі (вершини графа)
1	$e_{0_{Дж},1}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{0_{Дж},2}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{1,0_{Сп}}(t_3)$	$a_{п3}, a_3$	—
4	$e_{2,0_{Сп}}(t_4)$	$a_{п4}, a_4$	—
5	$e_{1,2}$ , якщо $z_{2,3}=2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{п5}$	$v_1$
6	$e_{1,2}$ , якщо $z_{2,3}=1$	$a_{п2}, a_{п4}, a_{п5}$	$v_2$

Граф АРЗ, відповідний проведеному розбиттю, зображений на рис. D.31.

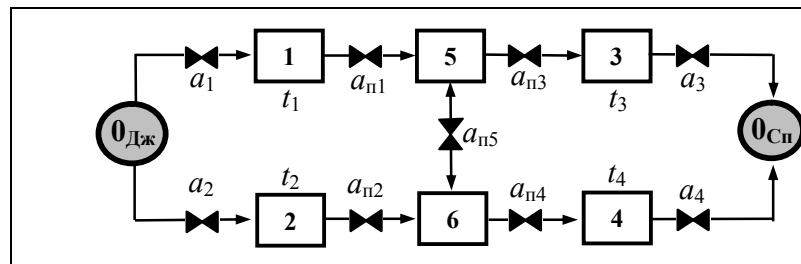


Рис. D.23 – Граф АРЗ для системи двох паралельних трубопроводів, сполучених однією перемичкою М-типу

Не хай  $p_i$  – загальна технічна надійність трубопроводів  $i$ -ї АРЗ,  $i = \overline{1,6}$ ;  $p_{aj}$  – технічна надійність  $j$ -ї засувки,  $j = \overline{1,4}$ ;  $p_{пk}$  – технічні надійність засувки, що належить перемичці,  $k = \overline{1,5}$ .

Перша модель надійності (при знаходженні центральної засувки  $a_{п3}$  перемички М-типу в положенні «відкрито») відповідає схемі, зображеній

на рис. D.24, а друга (при знаходженні засувки  $a_{п3}$  в положенні «закрито») схемі на рис. D.25.

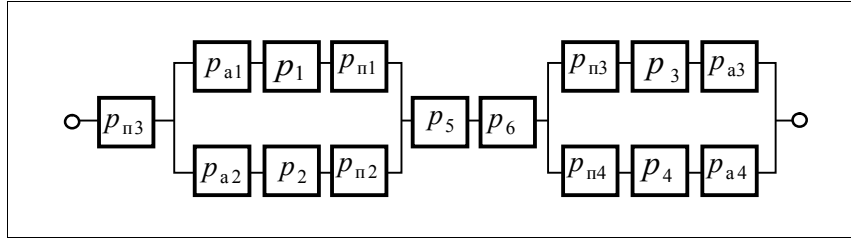


Рис. D.24 – Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $M$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито»

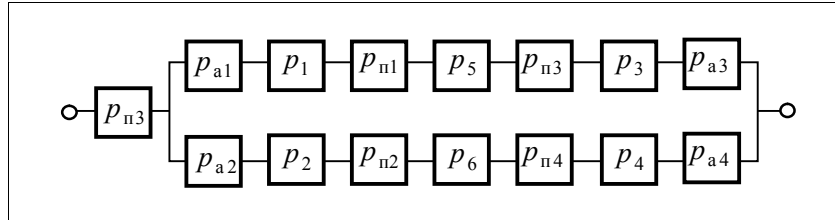


Рис. D.25– Розрахункова модель функціональної надійності системи двох паралельних трубопроводів, сполучених перемичкою  $M$ -типу, при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито»

Згідно з розрахунковою схемою (рис. D.24), функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «відкрито» визначається виразом

$$P_{2+п5,M,відкр}^f = p_{п3} [1 - (1 - p_{a1} p_1 p_{п1})(1 - p_{a2} p_2 p_{п2})] \times \\ \times p_5 p_6 [1 - (1 - p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (D.50)$$

Згідно з розрахунковою схемою (рис. D.25) функціональна надійність системи при знаходженні центральної засувки в положенні «закрито» визначається виразом

$$P_{2+п5,M,закр}^f = p_{п3} [1 - (1 - p_{a1} p_1 p_{п1} p_5 p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_{a2} p_2 p_{п2} p_6 p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (D.51)$$

Технічною ненадійністю АРЗ №5 і №6 через порівняно невелику сумарну довжину трубопроводних ділянок (в порівнянні з АРЗ №1, №2, №3 або №4) можна нехтувати, тобто  $p_5 = p_6 = 1$ .

Якщо всі засувки в системі мають один і той же тип і експлуатувалися в рівних умовах протягом рівних періодів часу, то можна вважати  $p_{ai} = p_{пj} = p_a$ ,  $i \in \overline{1,4}$ ,  $j \in \overline{1,5}$ .

З урахуванням зроблених зауважень виразу (D.50) і (D.51) відповідно набувають вигляду

$$P_{2+п5,M,відкр}^f = p_a \left[ 1 - (1 - p_1 p_a^2)(1 - p_2 p_a^2) \right] \left[ 1 - (1 - p_3 p_a^2)(1 - p_4 p_a^2) \right]; \quad (D.52)$$

$$P_{2+п5,M,закр}^f = p_a \left[ 1 - (1 - p_1 p_a^4 p_3)(1 - p_2 p_a^4 p_4) \right]. \quad (D.53)$$

Початкову вірогідність безвідмовної роботи кожної із зон №1, №2, №3 і №4 визначають за формулою (3.24) таким чином:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (D.54)$$

Підставляючи (D.54) в (D.52) і (D.53), отримаємо:

$$P_{2+п5,M,відкр}^f = p_a \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right)^2 \right]; \quad (D.55)$$

$$P_{2+п5,M,закр}^f = p_a \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^4 \right]^2 \right\}. \quad (D.56)$$

Якщо вважати технічну надійність всіх засувки абсолютною, тобто  $p_a = 1$ , то маємо дві спрощені математичні моделі функціональної надійності для системи, схема якої приведена на рис. D.22:

– для засувки  $a_{п3}$  в положенні «відкрито», згідно розрахунковій моделі на рис. D.24

$$P_{2+п5,M,відкр}^f = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2; \quad (D.57)$$



– для засувки  $a_{пз}$  в положенні «закрито», згідно розрахунковій моделі на рис. D.25

$$P_{2+п5, M, \text{закр}}^f = \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \right\}. \quad (\text{D.58})$$

Таким чином, шукана спрощена модель оцінки функціональної надійності системи з перемичкою  $M$ -типу має вигляд

$$1 - \left[ 1 - \left( \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \leq P_{2+п5, M}^f \leq \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (\text{D.59})$$

## Додаток Е. Обчислювальні експерименти з перевірки адекватності математичних моделей розрахунку функціональної надійності

### Е.1. Обчислювальний експеримент ОЕ-3

Обчислювальний експеримент ОЕ-3 здійснюється стосовно перевірки математичної моделі (6.9). На відміну від експерименту ОЕ-2, об'єднувальний масив **М** має розмір  $2 \times 68$ . Крім того, замість логічного виразу  $L_1$  аналізує вираз  $L_2$ .

Схема алгоритму зображена на рис. Е.1.

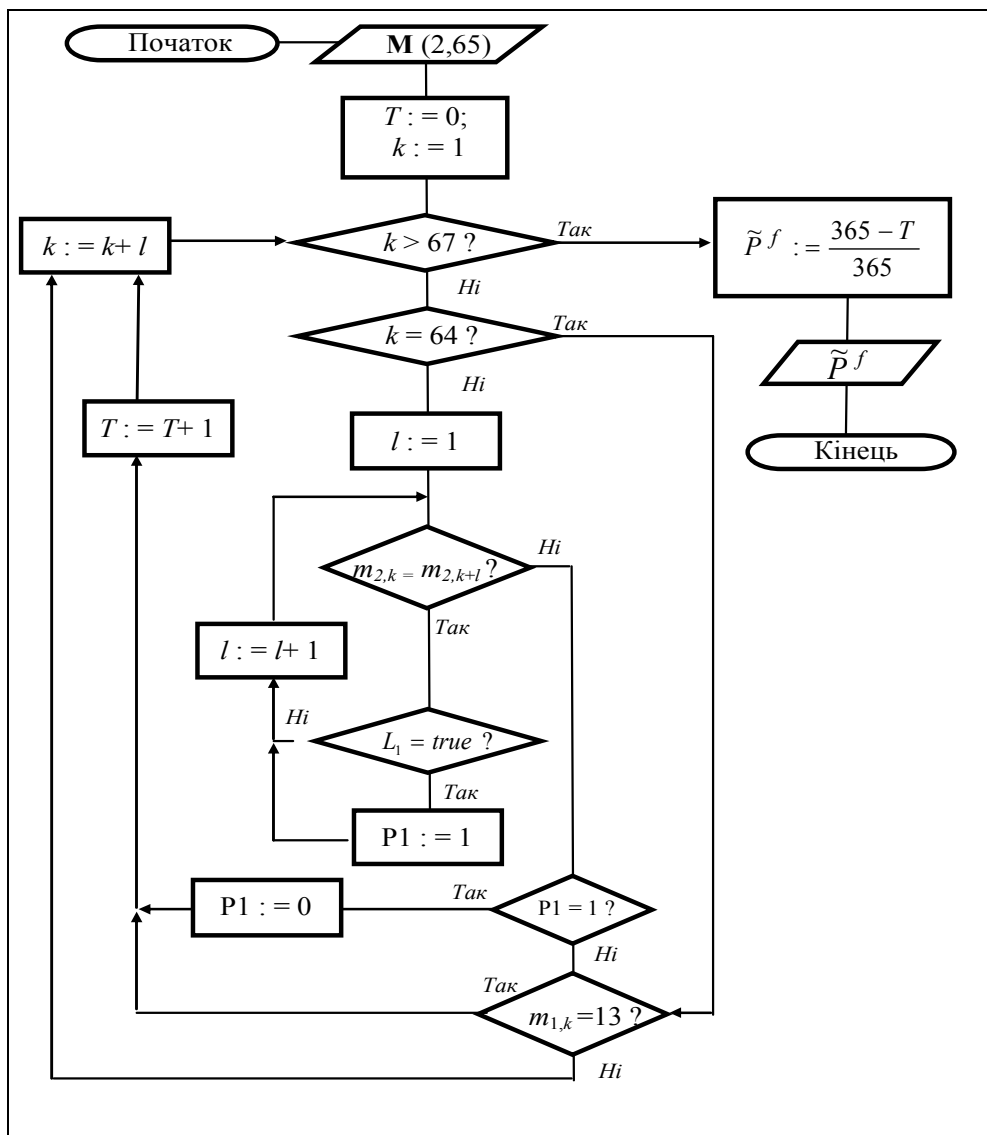


Рис. Е.1 – Схема алгоритму розрахунку  $\tilde{P}_{f_2}$

Логічний вираз  $L_2$  визначається таким чином:

$$\begin{aligned}
 L_2 = & (m_{1,k} = 13) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 1) \vee (m_{1,k} = 5) \vee (m_{1,k} = 9)) \wedge \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 13) \vee (m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6) \vee (m_{1,k+l} = 10)) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7) \vee (m_{1,k+l} = 11)) \wedge ((m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8) \vee (m_{1,k+l} = 12))) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 2) \vee (m_{1,k} = 6) \vee (m_{1,k} = 10)) \wedge \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 13) \vee (m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5) \vee (m_{1,k+l} = 9)) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7) \vee (m_{1,k+l} = 11)) \wedge ((m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8) \vee (m_{1,k+l} = 12))) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 3) \vee (m_{1,k} = 7) \vee (m_{1,k} = 11)) \wedge \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 13) \vee (m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8) \vee (m_{1,k+l} = 12)) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5) \vee (m_{1,k+l} = 9)) \wedge ((m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6) \vee (m_{1,k+l} = 10))) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 4) \vee (m_{1,k} = 8) \vee (m_{1,k} = 12)) \wedge \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 13) \vee (m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7) \vee (m_{1,k+l} = 11)) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5) \vee (m_{1,k+l} = 9)) \wedge ((m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6) \vee (m_{1,k+l} = 10))).
 \end{aligned}$$

Результати обчислювального експерименту Е3 за алгоритмом на рис. Е.1 подані у вигляді діаграми на рис. Е.2 і табл. Е.1.

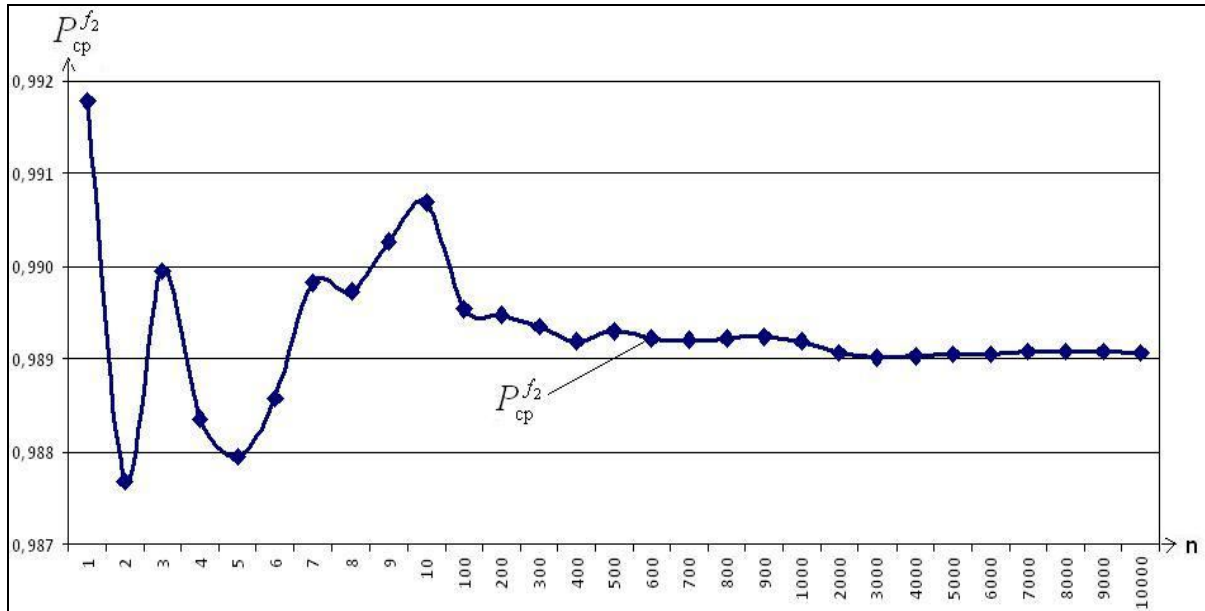


Рис. Е.2 – Діаграма залежності  $P_{cp}^{f_2}$  від числа експериментів  $n$

Таблиця Е.1 – Результати обчислювального експерименту ОЕ-3

Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$	Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$
1	0,991781	0,991781	600	0,991781	0,989219
2	0,983562	0,987671	700	0,980822	0,989209
3	0,994521	0,989954	800	0,980822	0,989223
4	0,983562	0,988356	900	0,983562	0,989245
5	0,986301	0,987945	1000	0,975342	0,9892
6	0,991781	0,988584	1100	0,994521	0,989123
7	0,99726	0,989824	1200	0,991781	0,989128
8	0,989041	0,989726	1300	0,978082	0,989132
9	0,994521	0,990259	1400	0,989041	0,989127
10	0,994521	0,990685	1500	0,99726	0,989105
20	0,983562	0,989315	1600	0,994521	0,989096
30	0,989041	0,989498	1700	0,986301	0,989031
40	0,991781	0,989658	1800	0,986301	0,989037
50	0,980822	0,989315	1900	0,980822	0,989038
60	0,994521	0,989543	2000	0,991781	0,98906
70	0,983562	0,989432	3000	0,991781	0,989021
80	0,986301	0,989384	4000	0,989041	0,989038
90	0,991781	0,989285	5000	0,986301	0,989056
100	0,986301	0,989534	6000	0,991781	0,989048
200	0,994521	0,989479	7000	0,991781	0,989077
300	0,989041	0,989352	8000	0,989041	0,989089
400	0,994521	0,989199	9000	0,994521	0,989079
500	0,994521	0,989304	10000	0,980822	0,989069

Результат експерименту ОЕ-3  $P_{\text{ср.}}^{f_2} = 0,989069$  збігається з розрахунковим результатом  $P^{f_2} = 0,9890$ , отриманим методом АРЗ, з похибкою, що не перевершує 0,007%.

## Е.2. Обчислювальний експеримент ОЕ-4

Обчислювальний експеримент ОЕ-4 здійснюється стосовно перевірки математичної моделі (6.10). На відміну від експерименту ОЕ-2, об'єднувальний масив **М** має розмір  $2 \times 71$ . Крім того, замість логічного виразу  $L_1$  аналізує вираз  $L_3$ .

Схема алгоритму зображена на рис. Е.4.

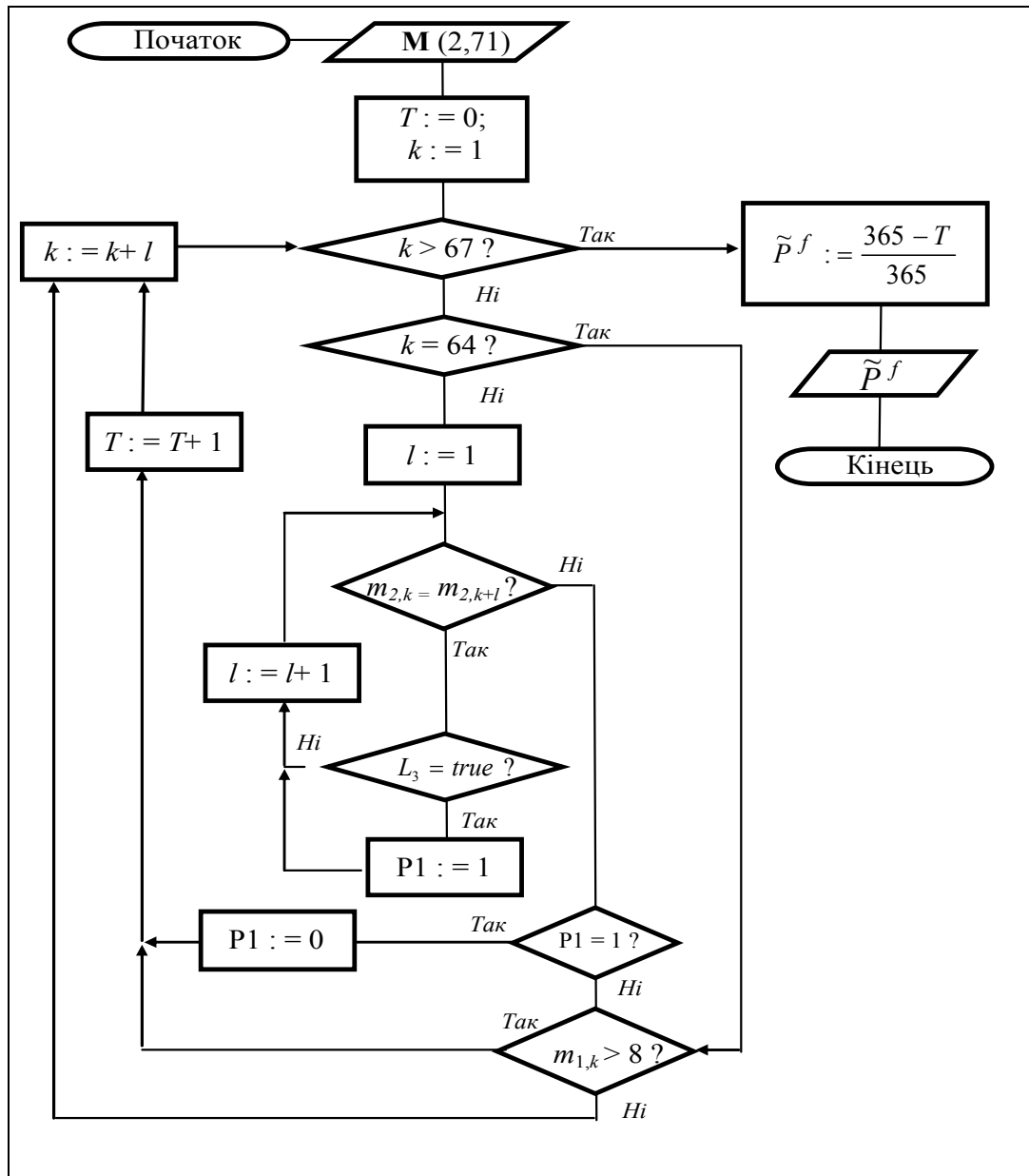


Рис. Е.3 – Схема алгоритму розрахунку  $\tilde{P}^{f_3}$

Логічний вираз  $L_3$  визначається таким чином:

$$\begin{aligned}
 L_3 = & ((m_{1,k} = 1) \vee (m_{1,k} = 5) \vee (m_{1,k} = 1) \vee (m_{1,k} = 5)) \wedge \\
 & \wedge (((m_{1,k+l} = 9) \vee (m_{1,k+l} = 11) \vee (m_{1,k+l} = 13)) \wedge \\
 & \wedge ((m_{1,k+l} = 10) \vee (m_{1,k+l} = 12) \vee (m_{1,k+l} = 14))) \vee \\
 & \vee (((m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7)) \wedge ((m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8))) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 3) \vee (m_{1,k} = 7) \vee (m_{1,k} = 4) \vee (m_{1,k} = 8)) \wedge \\
 & \wedge (((m_{1,k+l} = 9) \vee (m_{1,k+l} = 11) \vee (m_{1,k+l} = 13)) \wedge \\
 & \wedge ((m_{1,k+l} = 10) \vee (m_{1,k+l} = 12) \vee (m_{1,k+l} = 14))) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5)) \wedge ((m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6))) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k} = 9) \vee (m_{1,k} = 11) \vee (m_{1,k} = 13) \vee (m_{1,k} = 10) \vee (m_{1,k} = 12) \vee (m_{1,k} = 14)) \wedge \\
 & \wedge (((m_{1,k+l} = 1) \vee (m_{1,k+l} = 5) \wedge (m_{1,k+l} = 2) \vee (m_{1,k+l} = 6)) \vee \\
 & \vee ((m_{1,k+l} = 3) \vee (m_{1,k+l} = 7) \wedge (m_{1,k+l} = 4) \vee (m_{1,k+l} = 8))).
 \end{aligned}$$

Результати обчислювального експерименту Е4 за алгоритмом на рис. Е.3 подані у вигляді діаграми на рис. Е.4 та табл. Е.2.

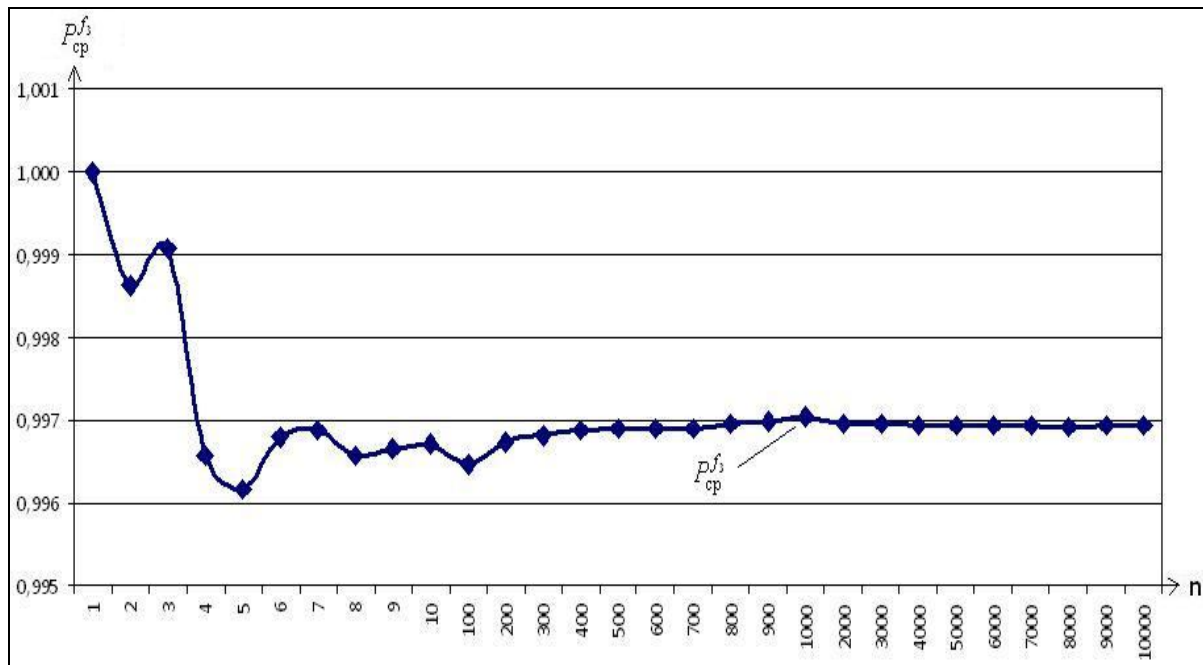


Рис. Е.4 – Діаграма залежності  $P_{\text{ср}}^{f_3}$  від числа експериментів  $n$

Таблиця Е.2 – Результати обчислювального експерименту ОЕ-4

Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$	Кількість експ., $n$	$\tilde{P}_n^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$
1	1	1	600	1	0,996890
2	0,99726	0,998630	700	0,99726	0,996908
3	1	0,999087	800	0,99726	0,996952
4	0,989041	0,996575	900	1	0,996971
5	0,994521	0,996164	1000	1	0,997041
6	1	0,996804	1100	0,994521	0,997034
7	0,99726	0,996869	1200	0,991781	0,997027
8	0,994521	0,996575	1300	0,994521	0,997012
9	0,99726	0,996651	1400	0,994521	0,997016
10	0,99726	0,996712	1500	1	0,997014
20	0,99726	0,997260	1600	0,994521	0,996967
30	0,99726	0,997352	1700	1	0,996978
40	0,994521	0,996781	1800	0,994521	0,996973
50	0,994521	0,996548	1900	0,99726	0,996968
60	0,99726	0,996393	2000	0,991781	0,996960
70	0,99726	0,996438	3000	0,991781	0,996967
80	0,994521	0,996507	4000	0,99726	0,996937
90	0,994521	0,996651	5000	0,99726	0,996940
100	0,994521	0,996466	6000	0,991781	0,996939
200	0,991781	0,996740	7000	0,99726	0,996930
300	0,99726	0,996822	8000	0,99726	0,996926
400	1	0,996877	9000	0,99726	0,996943
500	0,99726	0,996893	10000	0,99726	0,996947

Результат експерименту ОЕ-4  $P_{\text{ср.}}^{f_3} \approx 0,996947$  збігаються з розрахунковим результатом  $P^{f_3} \approx 0,9969$ , отриманим методом АРЗ, з похибкою, що не перевершує 0, 005%.

### Список використаних джерел інформації

1. *Абрамов Н.Н.* Теория расчета систем подачи и распределения воды / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
2. *Абрамов Н.Н.* Расчёт водопроводных сетей / Н.Н. Абрамов, М.М. Поспелов. – М.: Госстройиздат, 1962. – 227 с.
3. *Беляев Ю.К.* Статистические методы в теории надежности / Ю.К. Беляев. – М.: Знание, 1978. – 66 с.
4. Большая советская энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1970–1978. – Т.3, 17, 24, 26.
5. *Вендров А.М.* CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем / А.М. Вендров. – СПб: БХВ, 2000. – 240 с.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. *Гавриленко И.А.* Анализ методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем в автоматизированных системах управления / И.А. Гавриленко, Н.И. Самойленко // Коммунальное хозяйство городов: науч. - техн. сб. –К.: Техника, 2005. – Вып. 63. – С. 195–199. – (Серия «Технические науки и архитектура»).
8. *Гавриленко И.А.* Расчёт надёжности поставки целевого продукта конкретному потребителю в системах трубопроводного транспорта / И.А. Гавриленко, Н.И. Самойленко // Коммунальное хозяйство городов: науч. - техн. сб. – К.: Техника, 2006. – Вып. 67. – С. 222–228. – (Серия «Технические науки и архитектура»).
9. *Гавриленко И.А.* Эксплуатация и проектирование систем тепло-, газо- и водоснабжения с учетом надежности / И.А. Гавриленко, Н.И. Самойленко // II Всеукраинская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы энерго-, ресурсосбережения жилищно-коммунального хозяйства». – Алушта: ХО НТТ КГ и ПО, ХНАГХ, 2006. – С. 77-79.
10. *Гавриленко І.О.* Надійність постачання цільового продукту в складних трубопровідних транспортних системах: автореф. дис...канд..техн. наук: 05.22.01 / Гавриленко Ірина Олександрівна; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х., 2006. – 22 с.
11. *Гальперин Е.М.* Расчёт кольцевых водопроводных сетей с учётом надёжности функционирования. – Саратов: Саратовский ГУ, 1989. – 104 с.
12. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.



13. ГОСТ 27.002-83 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Госстандарт, 1984.
14. Душкин С.С., Краев И.О. Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения. – К., 1993. – 164 с.
15. Евдокимов А.Г. Минимизация функций и её приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. – Харьков: Вища шк., 1980. – 208 с.
16. Евдокимов А.Г., Панасенко А.А. Оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – Харьков: Основа, 1996. – 136 с.
17. Евдокимова А.Г., Самойленко Н.И. Интегрированная диалоговая система рациональной эксплуатации и развития систем подачи и распределения воды : Монография / Евдокимова А.Г. и Самойленко Н.И., Рябченко И.Н., Ильющенко В.Г., Вольвовский Д.Е, Маслак В.Н., Гречухин А.В., Егоров С.И. – Донецк: РИП «Лебедь», 1994. – 192 с.
18. Евдокимова А.Г. и Самойленко Н.И. Рациональная эксплуатация и развитие систем водоснабжения и водоотведения. Т.1. Компьютеризация в системах водоснабжения : Уч. пособие / Евдокимова А.Г., Самойленко Н.И., Коринько И.В., Кузнецов В.Н. – Харьков: ХТУРЭ, 1997. – 276 с.
19. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. – Харьков: Вища школа, 1980. – 144 с.
20. Ильин Ю.А. Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
21. Ильин Ю.А. Расчет надежности подачи воды. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
22. Ионин А.А. Надёжность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.
23. Ионин А.А. Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.
24. Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С. Краткий справочник по физике. – М.: Высш. шк., 1963. – 560 с.
25. Клемин А.И. Надежность ядерных энергетических установок. Основы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 344 с.
26. Коваленко И.Н. Исследования по анализу надежности сложных систем. – Киев: Наук. думка, 1976. – 211 с.
27. Коваленко И.Н., Кузнецов И.Ю. Методы расчета высоконадежных систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
28. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. – К.: Наук. думка, 1976. – 138 с.

29. *Лосев Э.А.* Топологические методы нахождения вероятностных характеристик системы электроснабжения промышленных предприятий (Тр. ВНИИПЭМ). – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 111-115.
30. Математическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1977–1985. – Т.3. – 1184 стб.
31. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко*. Т.2. Надежность электроэнергетических систем / Под ред. *М.Н. Розанова*. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
32. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко*. Т.4. Надежность систем теплоснабжения – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 351 с.
33. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. *И.А. Ушакова*. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
34. *Ожегов С.И.* Словарь русского языка. – М.: Рус. яз., 1986. – 797 с.
35. *Петросов В.А.* Управление региональными системами водоснабжения. – Харьков: Основа, 1999. – 320 с.
36. *Рудь И.А.* Методы, критерии, и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности. – Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.
37. *Рудь И.А.* Модели надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Радиоэлектроника и информатика, Харьков, 2000. №3 – С.86-87.
38. *Рудь И.А.* Расчёт надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 1999. – Вып. 20. – Ч.1. – С.37–42.
39. *Рудь И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и развитие инженерных сетей с учётом надёжности // Современные проблемы гуманизации и гармонизации управления. Материалы II Международной междисциплинарной НПК. – Харьков, 2001. – С.142–143.
40. *Рябинин И.А.* Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1971. – 347 с.
41. *Рябинин И.А., Киреев Ю.Н.* Надежность судовых электроэнергетических систем и судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1975. – 234 с.
42. *Самойленко Н.И.* Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и регионов : Монография / *Самойленко Н.И., Мальцев В.П., Евдокимов А.Г., Шавлов А.Т.* – Златоуст: Челябинский Дом печати, 1996. – 232 с.
43. *Самойленко Н.И.* Компьютерные интегрированные информационно-графические технологии рациональной эксплуатации и развития

инженерных сетей. – Дис...д-ра техн. наук: 05.13.02; 05.13.04. – Харьков, 1996. – 370 с.

44. *Самойленко М.І.* Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем : Монографія / *Самойленко М.І., Гавриленко І.О.* – Горлівка : ЧП «Видавництво Ліхтар»-Харків: ХНАМГ, 2009. – 184 с.

45. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Анализ функциональной надёжности различных конструкций магистральных трубопроводов // Коммунальное хозяйство городов.-К.: Техніка, 2009. – Вып. 86. – С.197–203.

46. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем // Устойчивое развитие городов. Материалы VI Международной НПК. – Харьков: ХНАГХ, 2008.

47. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А., Передерий Т.С.* Повышение надёжности функционирования магистрального трубопровода // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка, 2006. – Вып. 72. – С.193–200

48. *Самойленко Н.И.* Адекватность моделей функциональной надёжности трубопроводных систем : Монография / *Самойленко Н.И., Сенчук Т.С.* – Х.: Издательство «НТМТ», ХНАГХ. – 2009. – 115 с.

49. *Самойленко Н.И.* Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем : Монография / *Самойленко Н.И., Костенко А.Б., Гавриленко И.А., Сенчук Т.С.,* – Х.: Издательство «НТМТ», ХНАГХ. – 2009. – 276 с.

50. *Сенчук Т.С., Самойленко Н.И.* Резервирование магистральных трубопроводов как средство повышения функциональной надёжности // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 2009. – Вып. 86. – С.219–227.

51. Словарь иностранных слов. – М.: Рус. яз., 1986. – 608 с.

52. *Черкесов Г.Н.* Надёжность технических систем с временной избыточностью. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.

53. Энциклопедия кибернетики. – К.: Гл.редакция УСЭ, 1974. – Т2. – 624 с.

54. *Эндрени Дж.* Моделирование при расчетах надёжности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

55. *Samoilenko M.I.* On emergency localisation in water supply networks. Pros. of the Third International Congress on Industrial and Applied Mathematics. Hamburg, 1995.

Наукове видання

САМОЙЛЕНКО Микола Іванович  
СЕНЧУК Тетяна Сергіївна

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В РОЗВИТКУ ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

МОНОГРАФІЯ

Редактор *М. З. Аляб'єв*  
Комп'ютерне верстання *М. І. Самойленко*  
Дизайн обкладинки *І. П. Шелехов*  
Технічне редагування *Т. С. Сенчук*

Підп. до друку 02.07.10р.	Друк на ризографі.
Формат 60х84 1/16	Ум. друк. арк. 14,35
Тираж 500 прим.	Зам. № _____

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК №731 від 19.12.2001